

THÈME 1 : BIENS COMMUNS MONDIAUX

ULB

UCL
Université
catholique
de Louvain



SOUS LA DIRECTION SCIENTIFIQUE DE
Jean-Pascal van Ypersele
Marek Hudon



1^{ER} CONGRÈS INTERDISCIPLINAIRE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

QUELLE TRANSITION POUR NOS SOCIÉTÉS ?

31/01/13
01/02/13

NAMUR

Version téléchargeable de ce recueil disponible en couleurs sur le site
www.congrestransitiondurable.org

SERVICE PUBLIC DE WALLONIE — NAMUR — 2013



1^{er} Congrès
interdisciplinaire du
développement durable

Quelle transition pour nos sociétés ?

Thème 1

Biens communs mondiaux

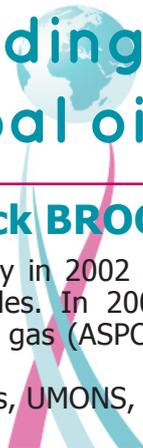


Namur, les 31 janvier et 1er février 2013

Table des matières

Understanding the decline of global oil exports <i>Patrick BROCORENS</i>	5
Le rêve de croissance économique confronté à la réalité des limites physiques et technologiques de l'énergie <i>Hervé JEANMART, L. POSSOZ</i>	27
Loi, innovation variétale et diversité biologique <i>Caroline KER</i>	41
La distribution des richesses naturelles et écologiques <i>Bruno KESTEMONT</i>	61
The governance potential of ecosystem services research in Belgium <i>Hans KEUNE, S. JACOBS, T. BAULER, J. CASAER, T. CERULUS, B. DENAYER, N. DENDONCKER, H. DENEFF, I. LIEKENS, A. PEETERS, T. SCHEPPERS, I. SIMOENS, J. STAES, F. TURKELBOOM, K. VAN DER BIEST</i>	73
Captage et stockage du carbone : Quel potentiel pour une transition durable ? <i>Noé LECOCQ</i>	89
Global transition towards forest restoration and sustainable land uses <i>Patrick MEYFROIDT, Derek BRUGGEMAN, Isaline JADIN, Yann le POLAIN de WAROUX, Eric F. LAMBIN</i>	117
A metrics for the sustainability value of steel <i>Jean-Sebastien THOMAS, A CARVALLO, JP BIRAT</i>	135
L'adaptation aux changements climatiques: étude de cas sur les propriétaires forestiers privés en Wallonie <i>Valentine VAN GAMEREN</i>	151
Triggers and barriers to energy/carbon efficiency measures in the ceramic, cement and lime sectors <i>Frank VENMANS</i>	171
Gestion durable des ressources minérales wallonnes : pistes de réflexion en vue d'une meilleure intégration de la problématique <i>Johan YANS</i>	195

Understanding the decline of global oil exports



Patrick BROCORENS

Patrick Brocorens got its PhD in chemistry in 2002 and used for years modeling tools to predict properties of hydrocarbon-based molecules. In 2007, he launched the Belgian section of the Association for the Study of Peak Oil and gas (ASPO), and now uses its expertise in modeling to predict oil production evolution.

Laboratory for chemistry of novel materials, UMONS, Belgium
e-mail: patrick.brocorens@umons.ac.be

Introduction

For the last few years, there has been a lot of discussion to know whether world oil production can still grow in the future, or is reaching a maximum that is the prelude to a long decline of the oil flow that irrigates the world economy. Though this debate about peak oil is still far from reaching its own peak, a more immediate concern far less discussed is the peaking and decline of oil exports. A production decline is indeed not mandatory for a decline of oil exports to happen. Oil exports peak when an oil producing country has a domestic consumption that rises faster than its production does. Such dynamics have to be studied carefully as declining oil exports are critical both for nations that depend on others for filling their oil thirst, and for oil exporting countries that see their oil-based earnings evaporating.

A few authors studied the dynamics of oil exports. Jeffrey Brown built an “export land model” that shows and explains that the decline of oil exports tends to accelerate with time (Brown, Foucher, 2010). Mitchell and Stevens (2008) built predictions of future oil exports for several countries and analyzed the consequences for the economies and policies of these countries.

In this study, we show that two indicators, the exports-to-production ratio, and the difference Δ between the growth rate of oil exports (r_{exp}) and the growth rate of oil production (r_{prod}), can complement these earlier prospective methods. Using these tools, we analyze the dynamics of oil exports at country and world level, examine the consequences of these evolutions, and suggest measures to deal with these consequences.

Oil production and oil consumption on a collision course

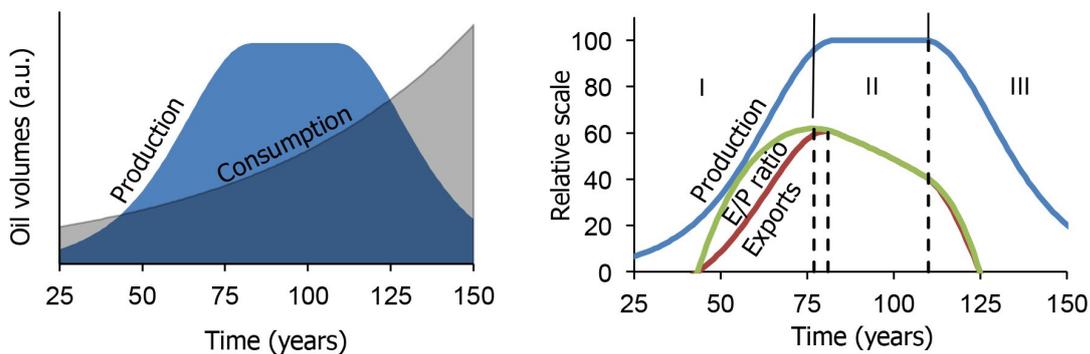
For an oil-producing country to export oil, it must produce more oil than it consumes. The evolution of oil exports is thus the combination of two trends: the evolution of production and the evolution of consumption.

In any country, the historical evolution of oil extraction follows a typical pattern. It begins by the discovery of a few fields and the successful production of the first barrels, which attract more prospections and kick off a dynamic of oil discoveries and development that feeds on past successes and expectations of new successes. The potential of the region is full and oil production grows exponentially. Later, as the industry matures, the new oil fields are more difficult to find and to exploit, they tend to be smaller, while more and more ageing fields enter into decline. The growth of oil production slows down. Eventually, when the pace of development of new fields is unable to compensate the loss of ageing fields despite ongoing investments, growth stops, the production of the whole country reaches a maximum and

then enters into decline. The historical production maximum is called peak oil. Often, some technological, economic or political effects rejuvenate the production, and several peaks or a plateau occur before the terminal decline sets in. However, in the long term, the general pattern of oil production looks like a succession of three phases: growth, stabilization, and terminal decline, as schematically represented in Figure 1 for an hypothetical country exploiting oil for more than 200 years.

As for oil consumption in oil exporting countries, it tends to increase with time, due to economic growth and fuel prices that are often lower than international standards. In the hypothetical country of Figure 1 (left), oil consumption is assumed to rise at a constant rate. Export is the share of production above the consumption curve. This country thus evolves from the status of oil importer to oil exporter, then to oil importer again. During the time window the country is exporter, oil exports also get through the three stages of growth, stabilization, and decline, but they peak and decline before production does (Figure 1, right). The export-to-production ratio, i.e. the share of production that is exported, follows a similar pattern, but peaks before both exports and production do (Figure 1, right).

Figure 1, left: Evolution of oil production and oil consumption in a model country. **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and the export-to-production ratio in the same model country^a. The dotted lines indicate the onset of the decline of these three parameters. The graphic has been divided in phase I (simultaneous growth of the three parameters), phase II (successive decline of the three parameters), and phase III (simultaneous decline of the three parameters).



a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

In Figure 1, right, we have distinguished three phases: phase I (simultaneous growth of production, exports, and the export-to-production ratio), phase II (successive decline of the three parameters), and phase III (simultaneous decline of the three parameters). In phases I and III, the rate of variation of exports is larger than it is for production: in phase I, exports represent a growing share of production (Figure 1, right), which itself is growing, and in phase III, exports represent a declining share of production, which itself is declining. The two compounded effects imply that in these phases, significant growth or decline of oil exports can occur in a relatively short period of time, sometimes in a few years.

Phase I lasts as long as the growth rate of production is above that of consumption. But with time, the growth rate of production always slows down, and when it has slowed down enough to match the growth rate of consumption, the export-to-production ratio peaks – exports then grow at the same pace as consumption and production – and phase II starts. In phase II, the growth rate of production slows down further and drops below that of consumption, and the export-to-production ratio starts declining. Exports, however, can

continue growing for a while because the growth rate of production, though smaller than that of consumption, generally applies to a larger volume. Hence, the increment of production is still above the increment of consumption. But eventually, the increment of consumption becomes equal to the increment of production, and then becomes larger, and exports in turn reach their peak and start declining. This is especially true when production is plateauing, i.e. when no increment of production is observed at all. Finally, production starts declining and phase III starts. The decline of exports accelerates.

In a 'business as usual' trajectory, the export-to-production ratio, oil exports, and oil production peak and enter into decline sequentially. No one is affirming this pattern should always occur as strictly as described. Production can rebound and consumption pattern can change. It is imaginable that a peaking country implement new policies that decrease domestic consumption fast enough to offset any production decline, thus raising exports in the face of a declining production. If history is any guide, these measures are, however, politically challenging, at least in the magnitude required to produce significant effects on the level of exports. Thus, in the absence of such events, the 'business as usual' scenario prevails. This means that passing one of these peaks is a warning for the next two peaks, and signals the urgency for additional studies and adaptation of policies for both oil-exporting and oil-importing countries, especially that many changes of energy policies require much time, sometimes decades, to produce significant effects.

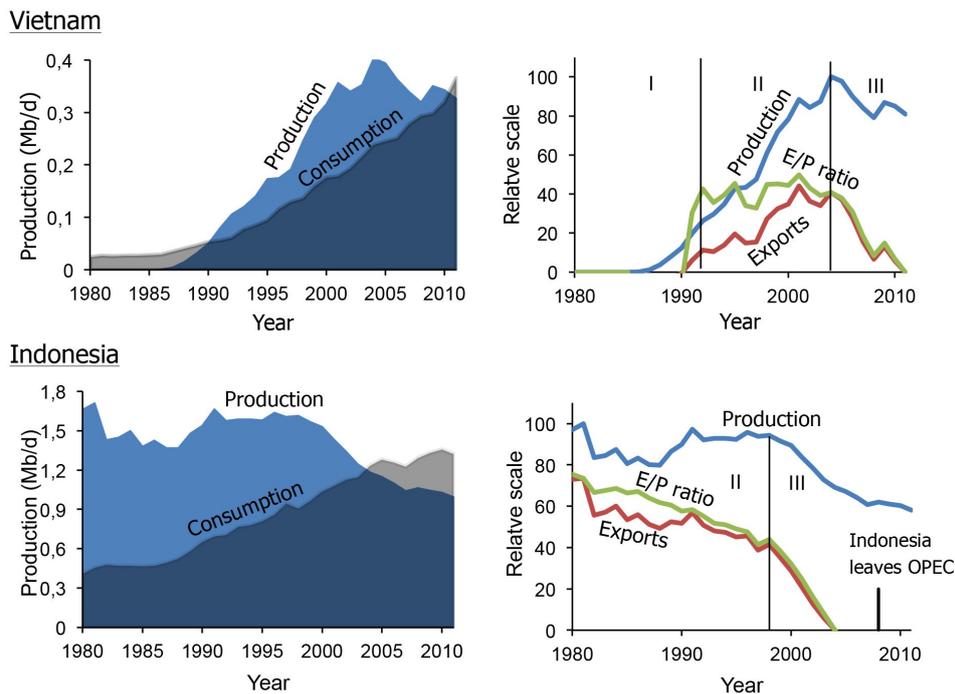
Two case figures: Vietnam and Indonesia

Two real countries are analyzed to validate the model: Vietnam and Indonesia. Consumption data were subtracted from production data to obtain net export values; unless specified otherwise, the EIA database has been used for all countries that will follow in this study.

For Vietnam, the export-to-production ratio plateaued in 1992, immediately after the country has become oil exporter (Figure 2). Although the production was growing at a strong pace of 12% per year, oil consumption was also growing at that pace, thus making stagnant the export-to-production ratio. This plateau lasted more than 10 years, and was low. Only 40% of the production was exported, meaning that exports were highly susceptible to a reversal of fortune in oil production. The rise of exports stopped in 2001, three years before production did. Exports then plummeted and disappeared in 10 years, while production declined by a mere 19% since their peak.

Vietnam is an example where the production downturn was sharp. Indonesia, on the contrary, maintained a long production plateau (1974-2000). During that period, the evolution of exports was thus entirely dominated by the evolution of consumption, which was growing at an average pace of 7% per year (BP, 2012), meaning a doubling of consumption every 10 years. As a result, exports had already halved when production finally started its decline in 2000, an event that accelerated the demise of exports. About 40% of the production was still exported in 1999, but five years later Indonesia had become a net oil importer (Figure 2). In January 2009, the country suspended its membership to the Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC), to which it belonged since 1962.

Figure 2, left: Evolution of oil production and oil consumption in Vietnam and Indonesia. **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and the export-to-production ratio in Vietnam and Indonesia^a. Phases I to III have been represented.



a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

The declining performance of exports with respect to production

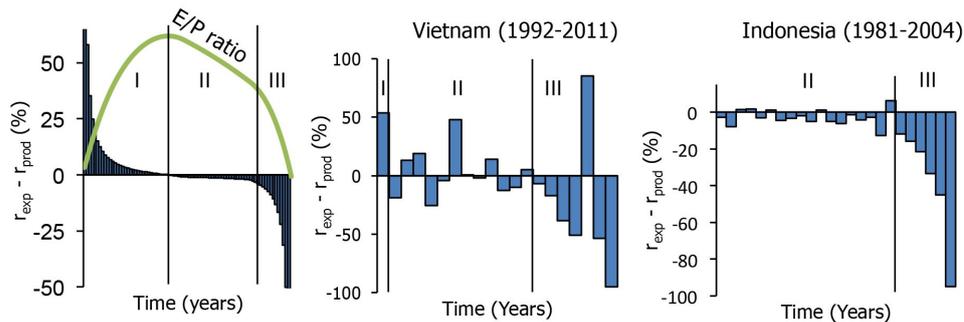
To better evaluate how exports perform with respect to production, the difference Δ between the growth rate of exports (r_{exp}) and the growth rate of production (r_{prod}) has been calculated. A positive Δ means that the rate of change of exports is some percentage points higher (equal to Δ) than that of production. Thus, if production increases, exports increase at a faster pace, and if production decreases, exports decrease more slowly or even continue growing. A negative Δ means that exports evolve more poorly than production. In a worst case scenario, production rises, but exports decline.

Initially, when a country becomes exporter, the difference between both rates is positive and huge (Figure 3), but it rapidly slows down because when exports grow faster than production, the export-to-production ratio increases, and that ratio cannot go beyond 100%. In reality, its maximum is always lower than 100% because all countries consume oil. When the exports-to-production ratio peaks (Figure 3), exports evolve like production, meaning that Δ is zero. Then, Δ turns negative, and the decline accelerates with time, especially in phase III.

The evolution of Δ has a very characteristic shape, which illustrates well that oil exports get through the phases of precipitous rise, slow erosion, and then accelerating decline (Figure 3). Indonesia, for instance, was characterized by a long period where the export growth rate performed a few percentage points below the production growth rate, then leaped over the cliff in the last six years of existence of the country as an oil exporter.

Figure 3: Evolution of the export-to-production ratio, and of the difference between the export growth rate (r_{exp}) and the production growth rate (r_{prod}), for the hypothetical country of

Figure 1, for Vietnam, and for Indonesia. Phases I to III have been represented.



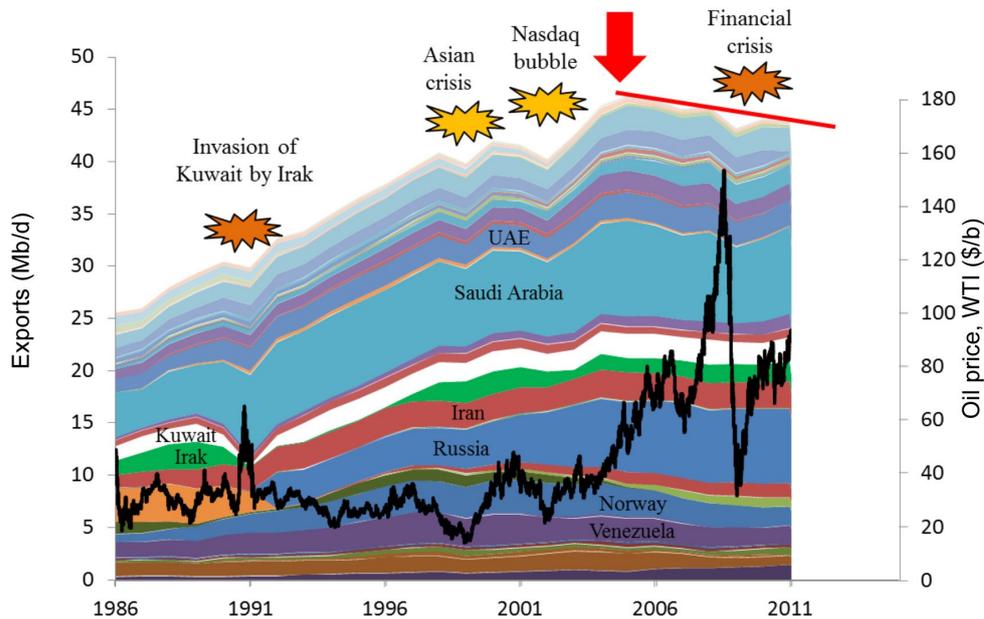
World oil exports in decline

World oil exports peaked in 2005 and since then have declined by 5.3% (2011, Figure 4).

This is not the first time in history that oil exports have suffered a sustained decline. During the 1970s, two oil-shocks rocked the occidental societies. Deep recessions and important policy changes occurred simultaneously in oil-importing countries, which quickly reduced oil consumption in the early 1980s. This was the counter-oil shock. With the slump of demand, world production, world exports, and oil prices all collapsed simultaneously, and hammered strongly the economies of oil exporting nations. The decline bottomed up in 1985. Then two decades of recovery followed, punctuated by temporary drops associated to economic crises. The recovery was a reality for oil production and exports, but not for the oil price, as excess capacity ensured that the market was well supplied, even in the context of sensitive geopolitical events.

The crisis of 1990-1991 provides a very good overview of oil excess capacity existing at that time, as two political events could have produced more dire consequences on the oil markets if that excess capacity had not been there. The first event is the breakup of the Soviet Union, which led to a precipitous decline of the country's oil production: -35% in only four years. A drop of such amplitude could have wiped out completely the exports of the second world exporter in the world. And indeed, in 1991, the exports had already collapsed by a whopping 32%. However, this drop was temporary and exports have quickly rebounded in the following years because consumption was declining still more precipitously than production, by 42% in four years. While the Soviet Union was collapsing and splitting into new countries, Iraq invaded Kuwait. In January 17 1991, Operation Desert Storm was launched. Both the Iraqi and Kuwaiti oil productions were halted, but that very day, the price of the West Texas Intermediate lost one third of its value, and finished at 21\$/b, i.e. a level typical of the 1980s and 1990s.

Figure 4: Evolution of world oil exports, distributed between oil-exporting countries, and of the oil price (\$2011, West Texas Intermediate spot price) since 1986. Economic crises are shown, with those of 1991 and 2008 related to an oil shock.

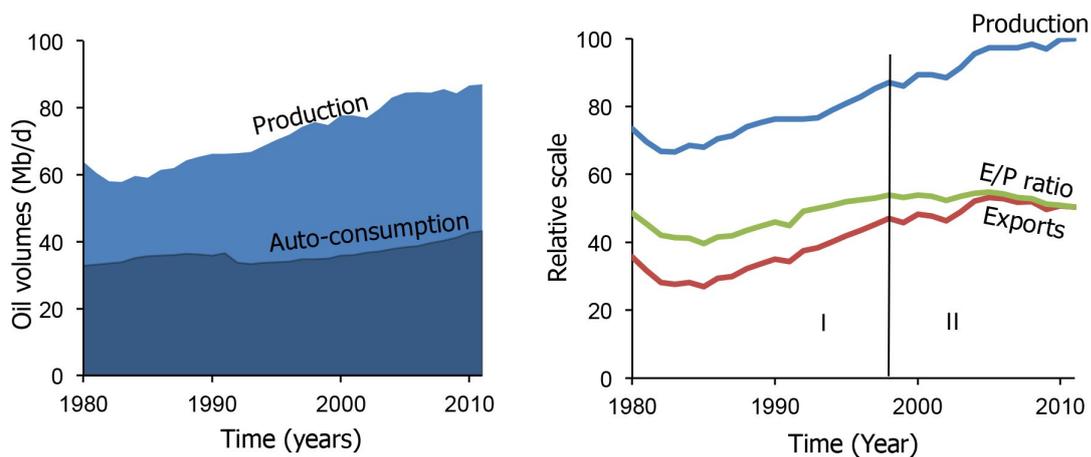


We may wonder why it is possible that the oil price has settled at such lows, given that the oil markets were simultaneously suffering two blows that have wiped out the equivalent of 12% of world exports. It is clear that the markets were confident that a successful resolution of the conflict with Iraq would happen soon, and that the release of the IEA strategic oil reserves helped significantly. But a sufficient excess capacity to dampen such events was likely the most critical factor. The loss of Iraqi and Kuwaiti oil exports and the breakup of the Soviet Union are clearly seen in Figure 4 (most of the USSR contribution, in orange until 1991, is displayed as Russian in the following years, in blue). Despite these events, world exports did not suffer much because Saudi Arabia, Norway, United Arab Emirates (UAE) and others, were able to quickly increase their production to compensate. The Δ of the rescuing countries was positive, and exports increased in higher proportions than production did. In total, world exports only dropped by 2%, and this drop has probably something to do more with the economic recession that followed the shock of the invasion of Kuwait in 1990, than with a real lack of oil on international markets, as the low oil prices of 1991 suggest.

Since the 1990s, world excess capacity has shrink, and the persistent decline of world exports observed since 2006 is different than the decline of the early 1980s. It started in a context of slowly rising oil prices in the face of a stagnant production. Due to the slow-motion energy crisis and the absence of any strong geopolitical events (at least until the Arab revolutions started at the end of 2010), no particular emergency response of the society to reduce the oil habit has been engaged in oil-importing nations. Hence, the decline of exports is not due to a lack of demand in oil-importing countries (though it eventually leads to demand destruction via increases of oil prices); it is instead driven by a strong demand in oil-exporting countries. World oil production and auto-consumption are displayed in Figure 5. Auto-consumption is consumption by oil producers of oil that they themselves produce. Auto-consumption is significant, now representing 50% of world production. The export-to-production ratio is thus also 50%. Since the bottom of the exports slump in 1985s, the export-to-production ratio increased from 40% to a maximum of about 55% at the end of the 1990s.

In these years, world exports thus expanded faster than world production did. Then, the export-to-production ratio plateaued for about 10 years and started a slow decline in 2006. Since then, exports are evolving more poorly than production, and because production is almost flat, exports are also declining since 2006.

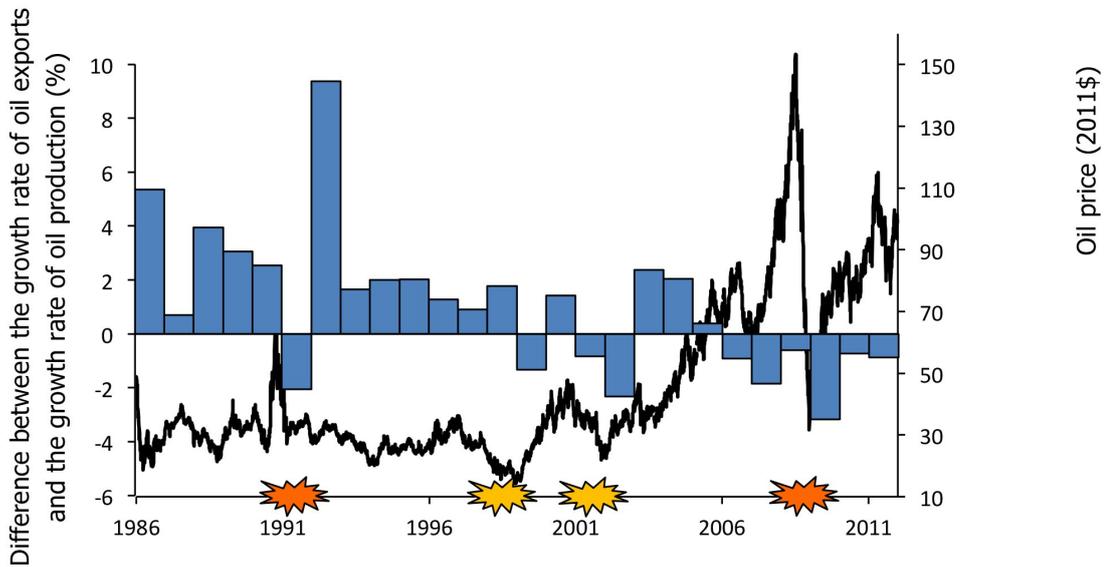
Figure 5, left: Evolution of world oil production and auto-consumption of oil exporters. Note the drop of consumption associated to the breakup of Soviet Union in 1991. **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and the export-to-production ratio for the world^a. Phases I and II have been represented.



a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

The performance of exports with respect to production since the end of the counter oil-shock is better appreciated by following the evolution of Δ (Figure 6). A clear trend is visible, punctuated by strong fluctuations related to changes in the fundamentals of the economy. Exports perform poorly with respect to production when the world economic environment is weak, as demand weakens in oil-importing countries. These drops of Δ are associated with declines in oil prices on international markets, as seen after the crises of 1991, 1998, 2001, and 2008. Such dynamics were also present during the counter oil-shock of the early 1980s, but at that time, Δ dropped deeply several years in a row, while later the drops were temporary and shallow. When the economy recovered, Δ rebounded. In 1992, the rebound was especially strong, likely helped by the return of Kuwait on international markets. Despite these ups and downs, for almost 30 years Δ has followed a trend as described by the theoretical model, slowly eroding from positive to negative territory. The crossing has spanned several years, with Δ going back and forth below and above zero between the end of the 1990s and 2006 (this period corresponds to the plateau of the export-to-production ratio). These results suggest that the deterioration of the fundamentals is a long term dynamics, and that the world is already in phase II. A good correspondence between the model and what is observed is particularly worrisome, as the model expects that the fall of Δ , and of oil exports in fine, accelerates with time if no drastic adjustments of energy policies occur in oil exporting countries.

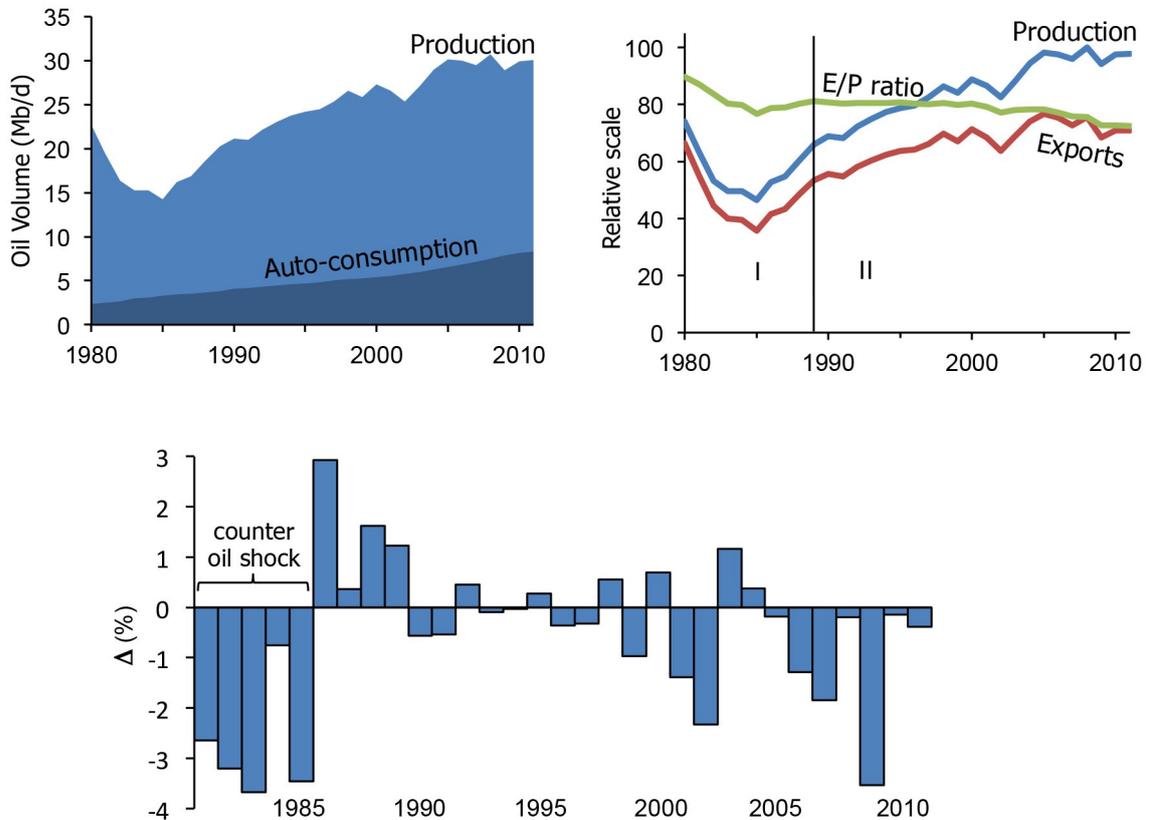
Figure 6: Evolution of the difference Δ between the growth rate of oil exports (r_{exp}) and the growth rate of oil production (r_{prod}) for the world. Evolution of the oil price (\$2011, West Texas Intermediate spot price). Economic crises are shown, with those of 1991 and 2008 related to an oil shock.



Apparently no rescue from the MENA countries, nor from Russia.

In 2011, the MENA (Middle East and North Africa) countries have contributed to half the global oil exports, and eight of the twelve OPEC members are from MENA. Their evolution is thus especially critical for the world. However, all indicators of the region are deteriorating and performing more poorly than at the world level. Production is on a plateau since 2005 (Figure 7). The export-to-production ratio is declining since 1990, i.e. earlier than for the world, and it is now lower than the minimum reached in 1985. The evolution is not promising, as shown by Δ , which is more and more in the red. As a result, export started their decline in 2006, and this decline thus contributes significantly to the decline of global oil exports observed since 2006. Again, these observations justify concerns about the ability of the region to fulfill the future oil demand of the world, especially that its role is expected to grow in the future due to the peaking and decline of oil production in many non-opec countries.

Figure 7, left: Evolution of oil production and auto-consumption of countries from Middle East and North Africa (MENA). **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and the export-to-production ratio for MENA countries^a. Phases I to III have been represented. **Bottom:** Difference Δ between the export growth rate (r_{exp}) and the production growth rate (r_{prod}), for MENA countries.



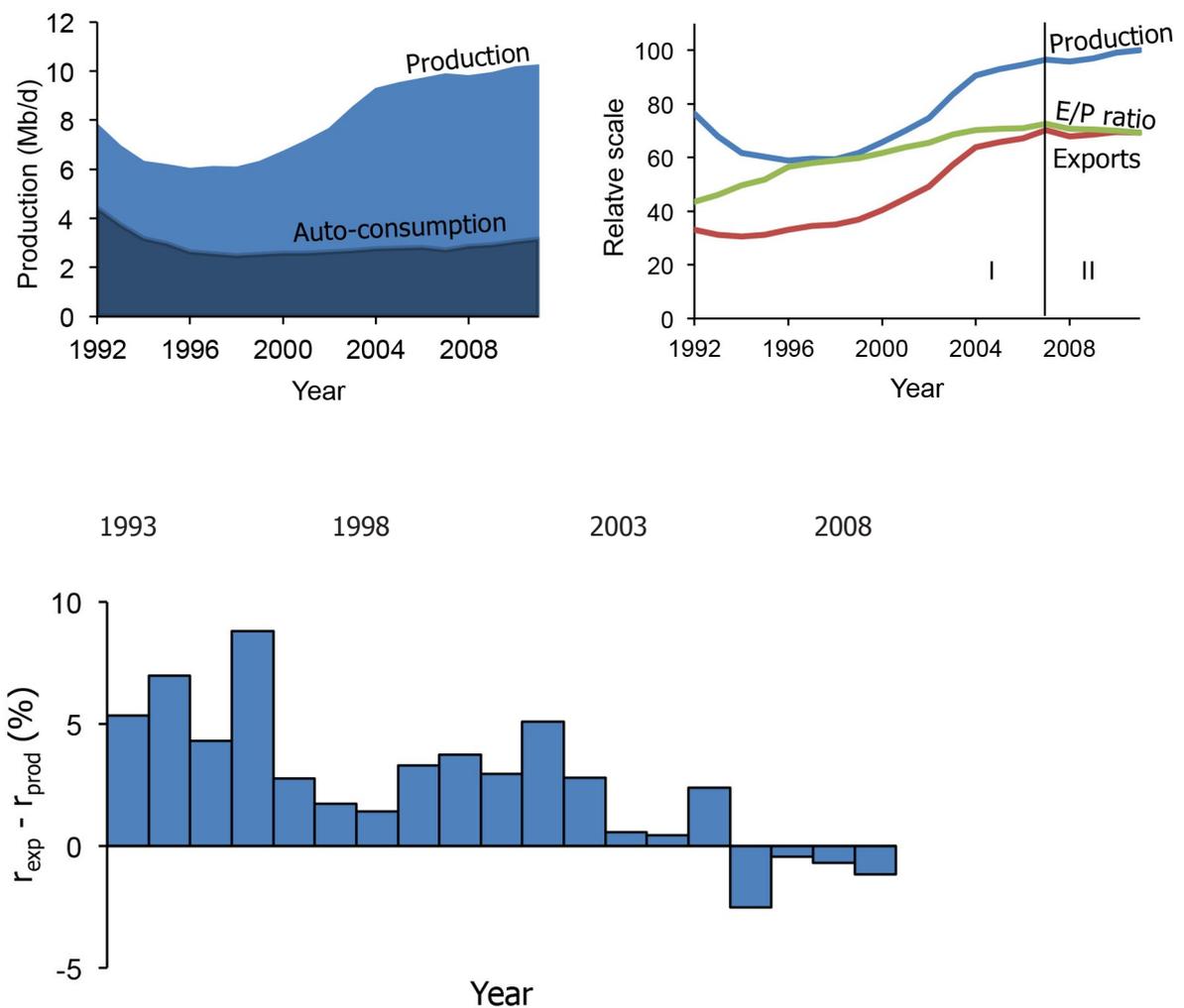
a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

Alongside MENA countries, Russia is a significant oil player, occupying the second place as an oil exporter, not far behind Saudi Arabia (Figure 4). Russia has also played a very prominent role in raising global oil exports in the early 2000s. After the collapse of Soviet Union, both oil production and consumption declined precipitously, but especially consumption, which dropped by about 45% in six years (Figure 8). Then, at the end of the 1990s, production recovered quickly, but consumption was slow to increase. The result was a quick and large increase in Russian oil exports. Between 1998 and 2004, Russia has increased its exports by 2,9 Mb/d, which represents 65% of the rise of global oil exports observed during the period. But Russia will not repeat this achievement in the future. Production has not much room for growth, while consumption does grow (by an average of 2.5%/y in the last five years). As a result, Russia entered in phase II in 2008, and its exports are now plateauing. The evolution of Δ shows the long term deterioration of the performance of exports with respect to production (Figure 8).

If MENA countries and Russia both continue deteriorating, the evolution of global oil exports will also likely continue deteriorating. The exportations of several other exporters are also evolving poorly, and we may wonder to which extent new exporters such as Chad

and Brazil can attenuate the losses observed elsewhere. What does attenuate those losses, however, is the rejuvenation of oil production in the US, which implies less import from the biggest oil importer in the world. With declining global oil exports, someone has to consume less, and economic crises are another mechanism that decreases oil imports. This effect has been at work in occidental countries since 2008. It is then a matter of debate whether these demand destructions are what is required to balance oil exports and imports, some studies claiming that high oil prices are one of the factors responsible of the crises that occidental countries suffer since oil prices are in triple digits (Sankey et al., 2010; Hamilton, 2009a,b).

Figure 8: Russia: **left:** Evolution of oil production and auto-consumption. **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and the export-to-production ratio^a. Phases I and II have been represented. **Bottom:** Difference between the export growth rate (r_{exp}) and the production growth rate (r_{prod}).



a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

Economic growth eating up oil export capacities

Vietnam, Indonesia, and the MENA countries powerfully illustrate the effects of domestic consumption on the level of oil exports. Though these exports are critical to balance their fiscal

and current account budgets, oil-exporting countries have generally much difficulty to avoid their exports disappearing under the burden of their own consumption.

One driver of energy consumption is economic growth, and no government is willing to cool down economic growth. Energy is necessary to any activity, and the growth rate of GDP, r_{GDP} , can be expressed as a function of the growth rate of the economic intensity of energy, r_{EIE} , and the growth rate of energy consumption r_E :

$$r_{GDP} = r_{EIE} + r_E + r_{EIE} \times r_E \quad \text{Eq. 1}$$

The “Economic intensity of Energy” is the amount of GDP produced per unit of energy consumed.

For small r_E and r_{EIE} (<10%/y if we deal with annual rates), the last term of Eq.1 can be neglected, and this approximation leads to the following expression:

$$r_{GDP} \sim r_{EIE} + r_E \quad \text{Eq. 2}$$

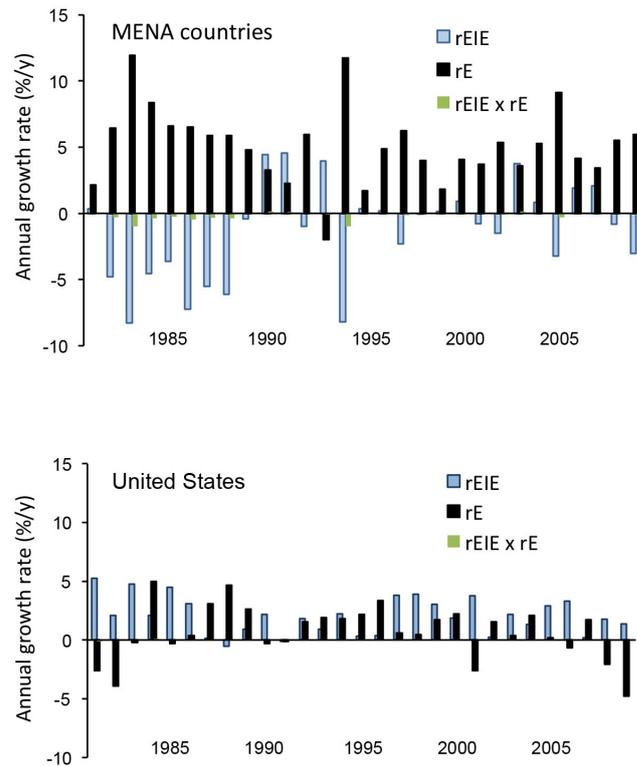
It is rather intuitive that building one more hotel in Dubai, or sending one more sms from Riyadh to Jeddah is made possible thanks to extra energy consumption. The value of these goods and services, added to many others, are used to calculate GDP. Thus, an economy increases its energy consumption as it grows. However, the efficiency at which an economy uses energy to produce wealth evolves with time. This can be due to technological and social factors, or because the contribution of the economic sectors to the economy changes with time. As a result, the growth rate of the economy is not strictly equal to the growth rate of energy consumption. Eq. 2 reflects these aspects.

Though the economic efficiency of energy evolves with time, improvements are generally slow, especially if they are technological, partly because it means investments, for instance in more efficient energy convertors in factories, transportation, households, and these investments are costly and are amortized over years. Hence, in the last 30 years, EIE has grown worldwide by about 1.5%/y¹. The United States beat the average (+2.0%/y)², but the MENA countries evolved in almost inverse proportion to the US (-1.4%/y). This poor performance (see Figure 9) means that the MENA countries consumed more and more energy to produce a given amount of GDP. Though most of the deterioration of EIE has occurred in the 1980s, nowadays there is still no signal that EIE is on track to improve.

1 The EIE growth rates of the world and MENA countries have been calculated using Eq.1, GDP growth rate in constant prices from IMF, World Economic Outlook, April 2012, and total primary energy consumption data from EIA.

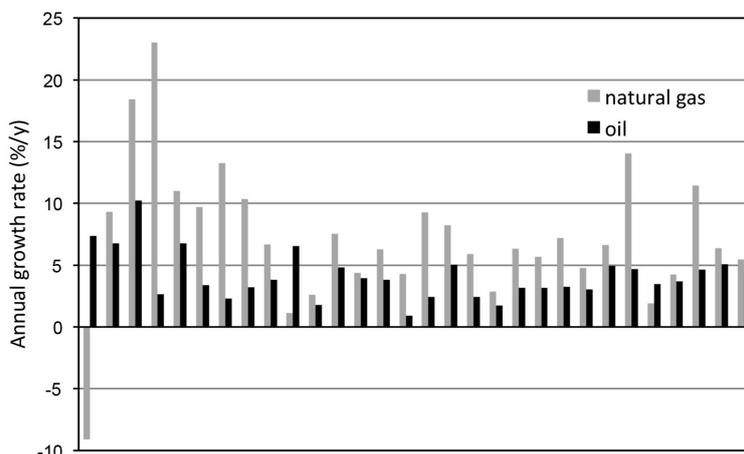
2 The EIE growth rates of the US have been calculated using Eq.1, GDP in constant prices from the US bureau of Economic Analysis, and total primary energy consumption data from EIA.

Figure 9: Annual growth rates of economic intensity of energy (r_{EIE}), of primary energy consumption (r_E), and the product of both rates ($r_{EIE} \times r_E$), from 1981 to 2009, for the MENA countries and the US. The sum of the three rates is equal to the annual growth rate of GDP.



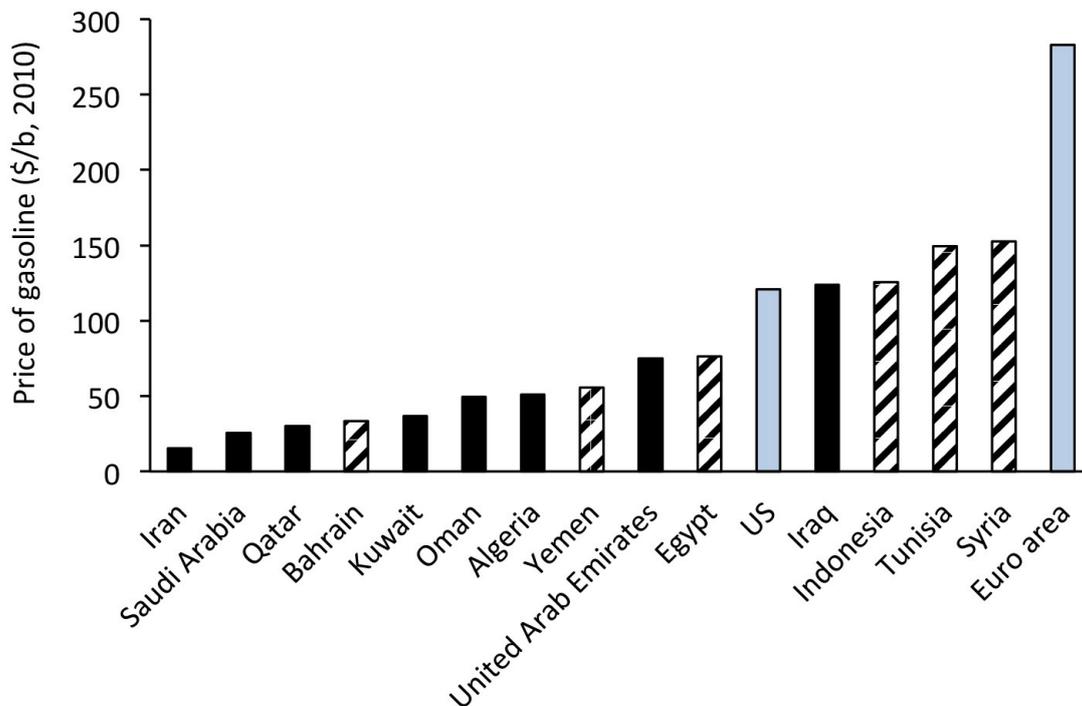
Due to a deteriorating EIE, in the last 30 years, energy consumption of MENA countries grew faster (5.1%/y) than the economy (3.3%/y). Most of this energy is oil and gas (Figure 10), oil growing at a slower pace (4.1%/y) than natural gas (7.2%/y) (EIA, 2012). Nowadays, such high rates are still prevailing, and if left unchanged – the IMF forecasts average economic growth of about 4%/y in the next five years (IMF, 2012), it means that oil consumption of MENA countries will double in only 18 years. Because less than two doubling of oil consumption would totally consume oil production from the region, leaving no exports, the amplitude of the challenge facing both oil-exporting and oil-importing countries is huge.

Figure 10: Annual growth rates of oil and gas consumption in Middle East and North Africa countries.



It is striking that the high oil prices environment that built up since 2004 did not slow down the growth rate of oil consumption in MENA countries. On the contrary, it accelerated it (4.3%/y on average, against 3.3%/y in the 1990s)³. This is likely because the massive inflow of petrodollars stimulates other energy intensive sectors of the economy, such as construction and petrochemistry, and encourages lifestyles that are more energy intensive, based on air-conditioning and the acquisition of cars, in markets where car ownership has significant margins for growth. The second reason behind the boom of oil consumption in an environment of triple digit oil prices on international markets, is that the consumers have no incentive to cut back on consumption; they are rather immune to high oil prices because in their country, fuels are generally sold well below international standards (Figure 11) (The World Bank, 2012). In Iran for instance, gasoline costs less than 25\$/b while it is almost 300\$/b in the euro area.

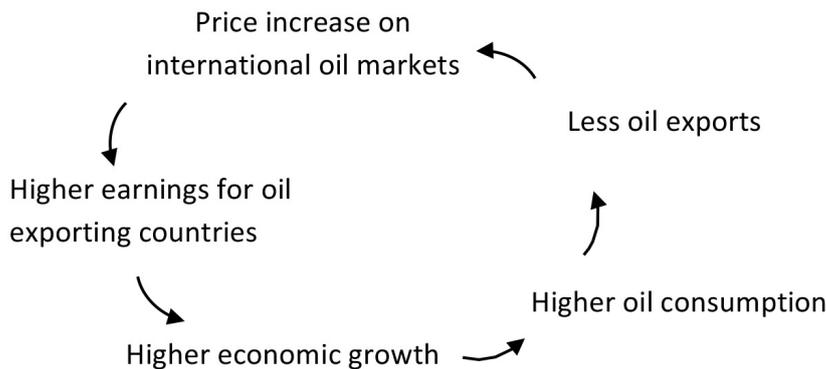
Figure 11: Average 2010 price of gasoline (in \$ per barrel^a) in some oil exporting countries (black), in some oil producing countries that have switched from the status of oil exporter to oil importer or will do so in the next five years (black and white), and in the US and the euro area (light color).



a: The price of gasoline is expressed in \$ per barrel, to compare to the international oil price

³ Averages based on EIA total petroleum consumption data from 2004 to 2009, and from 1989 to 1999.

Flows of petrodollars and cheap domestic gas thus contribute to create a feedback mechanism leading to growing oil consumption in oil exporting countries and higher prices on international oil markets:



Oil consumption encouraged by cheap fuel

As long as an oil-exporting country is self-sufficient to fill its tanks, fuel prices can be maintained by the government well below international standards. This policy is often regarded as a policy of fuel subsidy, though the basis to calculate the size of the subsidy is subject to debate. International bodies such as the IEA and the World Bank use the difference between fuel prices on international markets and domestic fuel prices. OPEC, however, considers that the reference price should be the domestic cost of oil production, not the international price (Fattouh, El-Katiri, 2012). From this point of view, if a national oil company extracts, refines, and sells oil below international prices, but above its cost, the company is still profitable, and such policy does not have to be considered as a subsidy. Only an opportunity to earn more is lost.

This is true as long as the country is self-sufficient. Once it has to import fuel from international markets, the lost opportunity becomes a real loss and a policy of cheap fuel becomes unsustainable for the government budget.

This is clearly what forced the Indonesian government to engage in reforms to gradually increase fuel prices towards international standards when it was realized that the country was losing its exports. However, it was (and still is) a long struggle, as such reforms have to be carefully crafted and explained to be successful. Many reforms faced public resistance and were rolled back several times, even though they have been accompanied by compensation programs to reduce the impact on low-income households. An OECD report lists policy changes to domestic energy prices since 1998. But it is mainly after the country has become oil importer that large changes occurred. In 2005, fuel subsidies were eliminated for large industrial consumers, the price of diesel more than doubled, and that of kerosene, used for cooking by many poor households, nearly tripled. In 2008, the government announced a plan to remove subsidies for all vehicles excluding motorcycles and public transportation vehicles by 2014, and increased gasoline and diesel prices by 29% in May 2008, and LPG prices by 23% in July. In December, however, the government erased part of the hike on gasoline and diesel due to the drop of international oil prices. These measures are examples of measures that were passed in the last ten years. As a result, the gasoline price is today on a par with that in the United States (Figure 11). The adjustments are still ongoing and the results on domestic consumption, though visible (Figure 2), are clearly insufficient and unable to restore Indonesia in its former status of oil exporter. Up to now, these measures only slowed down the growth

of oil consumption; oil consumption declined in the two years following the 2005 adjustment, but then rebounded, and exceeded the 2005 level in 2008.

Focus on Saudi Arabia

Saudi Arabia is the first oil exporter in the world, and is still regarded by many as the only country remaining as a swing producer able to dampen geopolitical shocks and to maintain some oil price stability. However, the degradation of the parameters of the MENA countries reflects in large part the degradation of the Saudi parameters. With a population growing rapidly, and high unemployment, economic growth is mandatory, but this, in turn, fuels energy consumption. The current energy consumption of Saudi Arabia is growing at twice the rate of GDP growth, meaning that the EIE of the country is deteriorating. Even the non-oil sector GDP, less affected by the price of oil on international markets than total GDP, does not perform well either (Lahn, Stevens 2011).

Energy used in the country is mainly oil and gas, both domestic energies cheap to produce. Cheap prices provide strong incentives for both domestic and international petrochemical industries to develop in Saudi Arabia, with nowadays about 17% of the total oil and gas consumption used as industrial feedstock. Water desalination also requires much energy, and this sector is projected to grow in the future. But electricity producers are on top of the heaviest consumers, with the result that the entire domestic production of natural gas is consumed locally. And due to the reluctance of the country to import additional quantities of natural gas, shortages have appeared in the last decades, especially upon peak power demands in the summer month, for air-conditioning. Natural gas shortages prompted some substitution from gas to oil to feed petrochemical and power plants, thus reversing a four decades decline in the share of oil in the mix of primary energy consumption.

The Saudi authorities are aware that this strong growth of electricity demand is threatening their hydrocarbon-based economy, and they have plans to produce electricity using nuclear energy, concentrated solar energy, photovoltaic, and wind power. But the scale of the task (more than doubling the current power production by 2030) and international political hurdle to massively deploy nuclear power in Saudi Arabia does not bode well for the future of oil exports (Lahn, Stevens 2011).

According to a study from Chatham House, on a "business as usual" trajectory, even if Saudi Arabia is able to sustain a production above 12 Mb/d, the country would become a net oil importer by 2038, and due to its high dependence on oil revenue, its economy would collapse before that point, with deficits appearing in its fiscal and current accounts as early as 2023 (Lahn, Stevens 2011). The state of these accounts not only depends on volume exported, but also on the price of oil on international markets. And with budgetary needs that increase with time, the price that Saudi Arabia considers fair tends to rise over time: it was \$35/b in 2004-05, \$70-80/b in 2010-11, and now, the Institute of International finance estimates that oil has to be above \$88/b to maintain the 2011 budget in positive territory (Lahn, Stevens 2011). This increase is in large part due to the vast sum of money that the government injected to appease the population during the Arab Spring, about \$37bn, which correspond to add \$14/b on the price of oil exports for 2010. Much of this extra spending is permanent, for instance in the form of pay raises for the state employees.

But before Saudi Arabia becomes oil importer – but from where could it import oil? – we have to contemplate the long decline of its exports. The oil exports of Saudi Arabia have already declined by 8.5% between 2005 to 2011, while production increased by 0.5%.

Chatham House estimates that current consumption trends could deprive the world market of up to 2 mb/d by 2020 compared with the IEA's supply scenario (Lahn, Stevens 2011). In 2010, Khalid A. Al-Falih, President of the national oil company, Saudi Aramco, said that an additional 1 mb/d of crude export capacity would disappear by 2028 if the evolution of the domestic energy consumption does not change. Exports would then drop below 7 mb/d. This represents a drop of 16% with respect to the 2011 export level, but this also means that more than the entire production growth that is expected in the future will be used for domestic consumption. With these developments, if Saudi Arabia is urged to maintain exports as high as possible to supply the markets, the country could be forced to run at full capacity in the very near future. The disappearance of its excess capacity will undoubtedly translate in more volatile oil prices.

Countries of the Arab spring: oil exports are gone

The evolutions observed in Saudi Arabia are also occurring in many oil exporting nations. Benefiting from high oil prices, oil exporters have generally grown faster than their oil importing neighbors in 2011, but have vulnerabilities similar to those of Saudi Arabia. For some, the problem posed by a rising consumption is compounded by a declining production. While Saudi Arabia is still in phase II, they are in phase III and have already been forced to change their policies of fuel prices and policies in other economic domains.

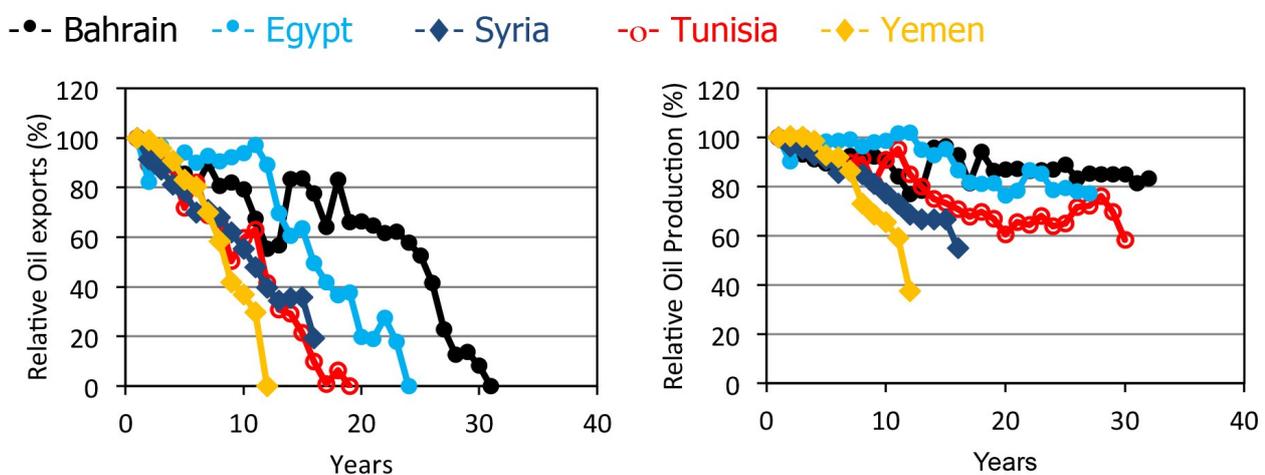
Mitchell and Stevens (2008) have defined three moments of economic development of oil-exporting countries, which roughly correspond to the three phases of the oil age that we have defined. Phase I corresponds to the depletion-led development: production and export rise, and oil revenues accelerate the country development by financing the fiscal and foreign exchange deficits of the non-hydrocarbon sectors. Phase II corresponds to the transition: production stalls, exports start falling, and the country must begin reducing its reliance on the hydrocarbon sector to support economic growth. This means less expenditure, higher taxes, higher fuel prices, lower imports or higher exports in the non-hydrocarbon sectors. Phase III corresponds to unsustainable dependence of the country's economy to the hydrocarbon sector: the need for alternatives accelerates, not only to maintain growth but to prevent economic decline.

As already discussed, many of those changes are politically risky, notably those affecting fuel prices, because cheap energy is part of the social contract. When Indonesia was forced to adapt its policy of fuel prices due to the disappearing of its oil exports, demonstrations and riots occurred in the country, those of 1998 having precipitated the downfall of Suharto. Little incentive thus exists to preventively revise policies to address the issue of energy prices. And, when they are finally adjusted, it is generally late in the process of disappearing oil exports, when the economic and social environment is more difficult. Though Saudi oil exports have declined in the last few years, the Saudi authorities have mainly focused on the supply side of the problem, by envisaging alternative energies to save oil for exportation, but they were reluctant to address the demand side of the problem. Being one of the cheapest countries in the world for transport fuel, Saudi Arabia even lowered the price when oil was at triple digit prices to content its population. And in a moment of high domestic tensions in the region, the Saudis are more encouraged than ever to promote such economic concessions.

Other MENA countries were less fortunate than Saudi Arabia, being in phase III or having already left phase III. At the end of 2010, a revolutionary wave of protests called the Arab Spring set ablaze several Arab countries. Regime were toppled in Tunisia, Libya, Egypt and Yemen, civil uprisings occurred in Bahrain and Syria. With the exception of Libya, all of these countries have recently lost their oil exports, or will lose them in the next few years. Tunisia

has become oil importer in 2000, Egypt in 2008, and Bahrain in 2010. And at the onset of the Arab Spring, Yemen and Syria were expected to start importing oil in about 5 years. The revolution, however, accelerated the decline of their oil exports. This is clearly seen in Figure 12: the last dot of the production and export curves of Yemen and Syria deviates significantly from the trend. A rebound of oil exports could thus happen in Yemen and Syria in the next few years if the political situation appeases, but this rebound will likely be temporary. Figure 12 also show that it took between 10 and 30 years for oil exports to disappear completely since their peak, while in the same time, production has far less declined: by less than 20% to more than 60%.

Figure 12: Evolution of exports (left) and production (right), and number of years since “peak exports” for Bahrain, Egypt, Syria, Tunisia, and Yemen. The year when exports have peaked, the value of exports and production has been set to 100, allowing to follow their evolution in terms of percentage.



To have a clear evaluation of the role played by the loss of oil exports on the political, social, and economic conditions that led to the Arab Spring, a careful analysis of data and events accumulated on several years must be done for each country, as oil can have different weights in their economies. However, impacts on budgets due to fuel subsidies and lost revenues, higher fuel prices than in other oil exporting countries (notably Syria and Tunisia, Figure 11), and the loss of a mean to appease social protests that confer petrodollars – a tool used by Saudi Arabia, Kuwait, Oman and others during the Arab Spring – likely played a role. In the past few years, several studies had already pointed difficulties associated to the disappearance of oil exports, even for countries like Yemen and Syria, which were still exporting significant amounts of oil when they were hit by the wave of protests.

For Yemen, an IMF document of 2010 indicates that the past few years have been exceptionally difficult for the economy (IMF, 2010). With the collapse of international oil prices in late 2008, and a declining oil production only partially offset by the production of liquefied natural gas that started in 2009, the country’s oil revenues have declined. Combined to large energy subsidies, the loss of oil revenue had a strong negative impact on public finances and the balance of payments. As oil revenues account for about 60 percent of government revenues and over 90 percent of export revenues, the loss of oil exports will have a significant impact on the economy. The complete disappearance of oil exports is expected by 2016, in the absence of new oil discoveries.

For Syria, much of gasoil and diesel have to be imported due to insufficient refining

capacity (EIA, 2011a). But because crude oil exports are in decline and imported refined products cost more than crude oil, the net value of Syria's oil exports and imports has strongly deteriorated. Between 2006 and 2008, the balance dropped from a positive value of \$1.9 billion to a negative value of \$100 million. Syria thus announced a long-term plan to phase out the subsidies, but these plans were delayed when the political situation turned sour in 2011.

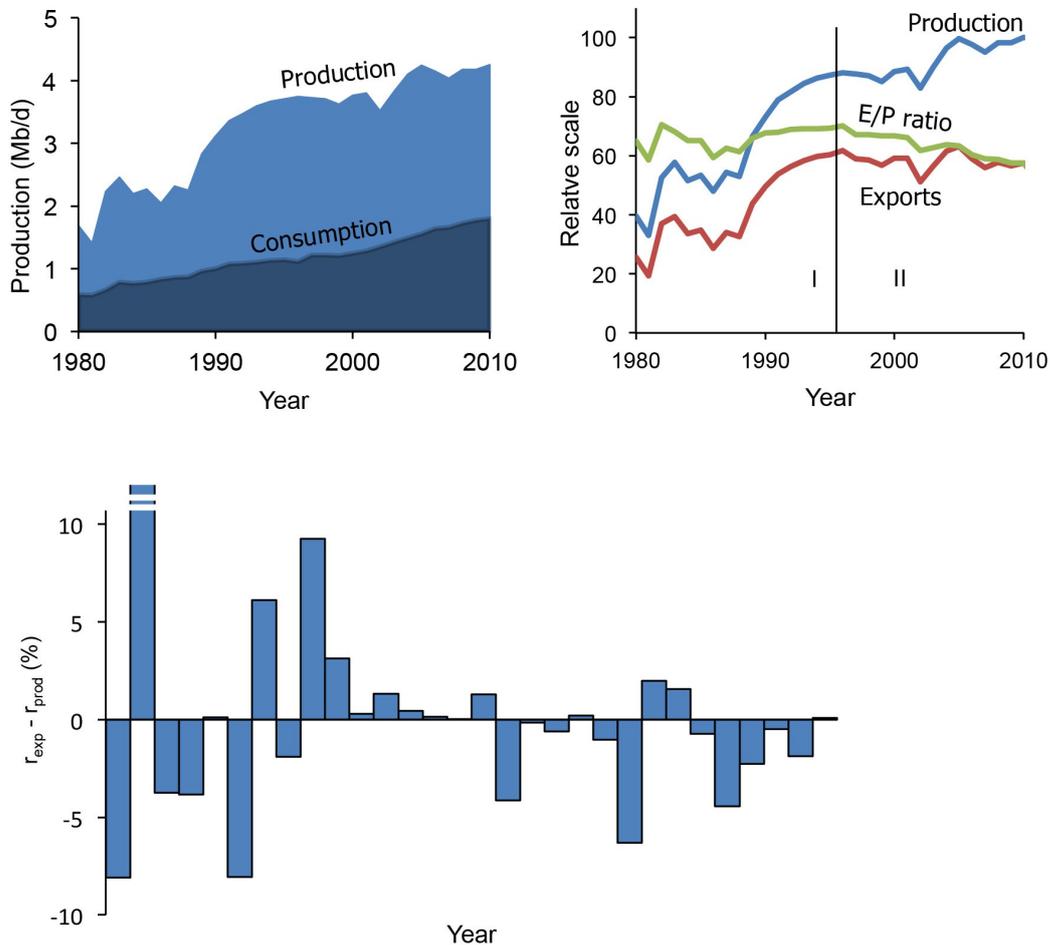
Is Iran next on the list?

Iran entered in phase II in the mid-1990s. Since then, oil production has increased by 13%, but this increase has been entirely consumed locally. The export-to-production ratio has declined to less than 60%, and consumption is still rising. A country is more vulnerable to the dynamics of oil consumption when its export-to-production ratio is low. The political and financial situation of Iran could thus change dramatically in the next few years, at the image of the fallen MENA countries, if its economy is forced to a disorderly exit from its hydrocarbon basis. It is a situation both Iran and the international community are likely aware, as it is exactly what the international sanctions are about. Their effect artificially pushes Iran in phase III, where oil exports vanish and the government budget becomes so unsustainable that the Iranian authorities eventually decide to negotiate on their nuclear program.

The vulnerability of Iran is aggravated because Iran has limited refinery capacity for the production of light fuels, and consequently imports a sizeable share of its gasoline supply (EIA, 2011b). And as the price of gasoline is heavily subsidized by the government – Iran still maintains one of the cheapest fuels in the world (Figure 11), a small decrease in oil exports has the potential to produce devastating effects on the government budget.

The Iranian authorities developed several responses to these risks. In December 2010, the legislature passed the Targeted Subsidies Law to phase out subsidies over a five-year period (CIA, 2012). According to EIA, in 2010, the price that private motorists pay for their monthly quota has been increased fourfold, and the quota allowance at that preferential price has been decreased from 100 to 60 liters per month (EIA, 2011b). The reform generated political opposition because of inflationary fears in the midst of an economic downturn. In addition to reforms affecting the demand side, the supply side (of fuels) has not been neglected neither. Petrochemical plants were converted to produce gasoline as a short-term measure, meanwhile a number of new as well as expansions of existing refineries were programmed. These projects are expected to come online between 2012 and 2017, in which case it is possible that the country will become a gasoline exporter in 2015. Though these measures will certainly help by avoiding wasting money importing refined products, it is far from certain that it will be sufficient to cut back on consumption and to avoid a crunch of oil exports in the medium term.

Figure 13: Iran: **left:** Evolution of oil production and auto-consumption. **Right:** Evolution of oil production, oil exports, and export-to-production ratio^a. Phases I and II have been represented. **Bottom:** Difference between the export growth rate (r_{exp}) and the production growth rate (r_{prod}).



a: Production and exports are relative to the production at the peak date. They are expressed in terms of percentage, as well as the export-to-production ratio.

Conclusions

In a business-as-usual scenario, for any oil-exporting country, oil production follows a typical pattern comprising a stage of growth, then stabilization with possible temporary rebounds, and finally a terminal decline. On the contrary, consumption leans towards relentless growth. Due to these dynamics, the oil exports-to-production ratio, net exports, and production pass their peak sequentially. Hence, any oil exporting country passing its first peak is warned that the next two peaks will follow and that it must adapt its policies without delay to reduce its economic dependency on hydrocarbons.

When such a sequence is observed for the world, oil-importing countries have also to adapt their policies to reduce their reliance on imported oil, as possibilities to replace failing oil-exporters by emerging oil-exporters become inadequate. For the world, the exports-to-production ratio has already peaked, in 1998, and oil exports have also peaked, in 2005,

and have declined by 5.3% (2011). This evolution is likely responsible of the high oil-prices observed since then, as the fall of supply of exported oil must be compensated by an equivalent demand destruction in oil importing countries.

Using the difference Δ between the growth rate of global oil exports (r_{exp}) and the growth rate of global oil production (r_{prod}), we showed that the degradation of the global oil exports is a long term dynamics, and not a temporary phenomenon. Though temporary rebounds can occur, global oil exports will likely continue declining. Indeed, global oil production has not much room to progress, and auto-consumption from oil-exporting countries is difficult to moderate, due to economic growth boosted by high international oil prices, and fuels that are maintained cheap by government intervention. Reversing this evolution would require immense efforts from oil exporters to reduce domestic demand, but the authorities are often reluctant to adopt such unpopular policies, and when they do so, it is often too little and too late. The demise of oil exports has already led to profound social, economic and political consequences for some oil-producing country (Indonesia, several countries engulfed in the Arab Spring).

These evolutions, especially the consistent decline of world oil exports observed since 2006, are particularly worrisome and should have prompted oil-importing countries to study carefully these dynamics and consequences, and implement energy policies that reduce oil dependency as fast as possible. Indeed, the decline of oil exports tends to accelerate with time, and a transition is costly and needs much time to produce significant effects.

To plan and implement quickly a broad transition to a low oil-society, it is critical to have a better forecast of the future availability of oil. Transparency must improve for oil data, especially reserves, which are unaudited by independent parties in most oil-exporting countries. It is also critical to study the likely consequences that the decline of global oil exports has and will have on the price of oil, as well as the political and economic consequences of the massive transfer of wealth from oil-importing to oil-exporting countries that is allowed by triple digit oil prices. Finally, technical and societal solutions must be implemented quickly to reduce oil consumption and release the grip that high oil prices exert on the economy, before high oil prices kill solutions to oil dependency. Once an economy is hurt, environmental policies, public transportation, subsidies to alternative energies and energy conservation, research and development budgets, can suffer badly.

Though high oil prices already affect painfully our societies, the issue of decreasing net oil exports has received very little attention up to now. Most studies still focus on global production, avoiding the fact that much oil is not traded on free markets, and is produced, transformed, and sold locally at prices controlled by the government.

References

- Brown, J.J., Foucher, S., (2010), Peak Oil Versus Peak Exports, ASPO conference
- BP, (2012), BP Statistical Review of World Energy 2012
- CIA, (2012), The World Factbook, Iran
- EIA, (2011), a: Country Analysis Briefs, Syria; b: Country Analysis Briefs, Iran
- EIA, (2012), Total petroleum and dry natural gas consumption data from 1980 to 2009
- Fattouh, B., El-Katiri L., (2012), United Nations Development Programme, Arab Human Development Report, Energy Subsidies in the Arab World
- Hamilton J.D., (2009), a: Oil Prices and the Economic Downturn, testimony before the « Joint Economic Committee of the United States Congress »; b: Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007-08 », Brookings Papers on Economic Activity, 215-259
- IMF, (2010), Republic of Yemen: Request for a Three-Year Arrangement Under the Extended Credit Facility—Staff Report; Press Release on the Executive Board Discussion; and Statement by the Executive Director for Yemen, September 2010
- IMF, (2012), World Economic Outlook April 2012
- Lahn, G., Stevens, P., (2011), Burning Oil to Keep Cool: The Hidden Energy Crisis in Saudi Arabia, Programme Report, Chatham House
- Mitchell, J. V., Stevens, P., (2008), [Ending Dependence: Hard Choices for Oil-Exporting States](#), Chatham House Report
- Sankey P., Clark D. T., Micheloto S. (2010), The End of the Oil Age, 2011 and beyond: a reality check, Deutsche Bank
- The World Bank, (2012), Pump price for gasoline (US\$ per liter); Fuel prices refer to the pump prices of the most widely sold grade of gasoline. Prices have been converted from the local currency to U.S. dollars.

Le rêve de croissance économique confronté à la réalité des limites physiques et technologiques de l'énergie

Hervé JEANMART¹, L. POSSOZ²

1 Institut de mécanique, matériaux, et génie civil (iMMC), Université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

2 Ingénieur conseil, Louvain-la-Neuve, Belgique

1. Introduction

Nos sociétés se sont développées grâce à l'abondance et la disponibilité des ressources énergétiques. Sans des quantités croissantes d'énergie, l'humanité n'aurait jamais pu poursuivre la croissance démographique et économique entamée il y a dix mille ans. Beaucoup d'arguments convergent cependant pour estimer que le niveau actuellement atteint est démesuré. Les combustibles fossiles sont actuellement consommés un million de fois plus rapidement que leur accumulation dans le sous-sol. Le réchauffement climatique et les autres dérèglements de la biosphère menacent la survie des civilisations si pas celle de l'espèce. L'empreinte écologique dépasse nettement les capacités de régénération naturelles.

La croissance moderne a débuté avec le charbon et se poursuit actuellement grâce à l'ensemble des combustibles fossiles. Aujourd'hui, ceux-ci représentent 80% de l'approvisionnement mondial en énergie primaire. Le complément est apporté par les énergies renouvelables et le nucléaire. Lorsque l'ensemble de cette énergie primaire est comptabilisé en équivalent pétrole, la consommation moyenne mondiale actuelle s'élève à 4.5 kep/per/j (kilogramme équivalent pétrole par personne et par jour), avec de très grandes disparités tant entre les régions qu'au sein d'une même région. Après plus de 20 ans de stagnation, la consommation d'énergie per capita a repris sa croissance après le début de ce siècle, sous la poussée de pays dont la consommation reste largement inférieure à la moyenne et en particulier celle des pays émergents asiatiques, et elle s'est à nouveau arrêtée en 2008 [Jancovici 2012]. Au niveau mondial, la consommation totale augmente d'autant plus que la population est toujours en croissance.

Cependant, au delà des enjeux climatiques dont l'acuité ne fait plus de doute, l'énergie sous une forme exploitable¹ se fait de plus en plus rare. Qu'elle soit renouvelable, fossile ou nucléaire, l'énergie est de plus en plus difficile à extraire de la nature, pour différentes raisons, pas uniquement techniques. Ces dernières années, l'économie mondiale n'est même plus arrivée à découvrir de nouvelles réserves d'énergie suffisantes pour simplement remplacer les quantités consommées durant l'année écoulée. La mise au ban pour raisons climatiques des énergies fossiles ne pourra qu'exacerber de manière extrême cette précarité des ressources que l'être humain utilise pour sa survie et son développement.

Dans ce contexte, l'économie peut-elle simplement se passer d'énergie et poursuivre sa croissance? Les progrès technologiques du futur (contrairement à ceux du passé) vont-ils engendrer une économie très sobre en énergie voire largement dématérialisée? Dans

¹ C'est d'énergie qu'il faudrait parler car c'est elle qui mesure effectivement ce qui est consommé. En effet, une quantité d'énergie ne diminue jamais, elle peut seulement être transformée, mais toujours dans le sens d'une dégradation.

l'affirmative, les crises énergétiques, environnementales et sociales pourront être résolues sans changer de paradigme socio-économique. À l'inverse, en cas de réponse négative, l'organisation actuelle de nos sociétés, basée sur la croissance économique, devra être remise en cause.

Les tenants de la croissance économique perpétuelle proposent deux grandes catégories de stratégies pour pallier une limitation de ressources énergétiques. Et les plus optimistes pensent que ces deux stratégies seront spontanément mises en œuvre, par la magie de la *main invisible* du marché chère à Adam Smith, par suite de l'augmentation du prix de l'énergie en réponse aux restrictions d'approvisionnement.

La première idée, assez naturelle, consiste à chercher à utiliser l'énergie de manière toujours plus efficace, permettant ainsi à l'économie de poursuivre sa croissance malgré les contraintes sur les approvisionnements en énergie. Jusqu'où peut-on réduire la quantité d'énergie nécessaire pour produire une tonne d'acier, ou une tonne de ciment? Y a-t-il un minimum inévitable, une quantité d'énergie qui se retrouverait en quelque sorte incluse dans le produit, le reste ayant été perdu dans les différentes étapes du processus de production? Il faut examiner en détail la place de l'énergie dans l'économie, ce qu'est l'amélioration de l'efficacité énergétique ou de manière équivalente, la diminution de l'intensité énergétique du produit intérieur brut (PIB).

La deuxième idée, plus générique, consiste à faire en sorte que la croissance soit assurée par une économie qui n'aurait pas besoin d'énergie. Une économie 'traditionnelle' non croissante, voire décroissante, serait complétée par une nouvelle économie non consommatrice d'énergie. Dans cette catégorie on retrouve le concept de dématérialisation ou celui de qualité (croissance de la qualité plutôt que de la quantité). Dans ce dernier cas, il restera à déterminer ce qu'est réellement l'amélioration de la qualité et en quoi elle se distingue de la simple inflation. Au fond, ce qu'il convient d'analyser c'est le degré de souplesse de la structure de l'économie, à système sociopolitique constant. Il s'agit d'évaluer si une consommation très peu matérielle pourrait se substituer à une autre, beaucoup plus matérielle afin de pouvoir poursuivre la croissance économique sans ses conséquences négatives.

Les deux stratégies sont analysées dans cet article à la lumière des lois et des limitations de la physique, notamment du second principe de la thermodynamique. S'il s'avère que le paradigme de croissance économique indéfinie est illusoire, comme cela a déjà été soutenu il y a plus de quarante ans [Meadows 1972], la question de la paix sociale en l'absence de croissance économique restera cruellement posée.

2. L'efficacité énergétique

Produire, c'est mettre en œuvre de l'énergie pour transformer des matières premières (ou des produits intermédiaires) en produits finis (ou en produits intermédiaires). Économie et énergie sont donc intrinsèquement liées. Sans énergie, pas d'économie. Il existe pourtant une certaine marge de manœuvre consistant à mieux utiliser l'énergie pour effectuer une même transformation. Cependant, en comparaison des énormes progrès déjà réalisés dans le passé, les progrès futurs apparaîtront bien plus modestes. De plus, force est de constater que ces progrès passés n'ont jamais entraîné une diminution de la consommation globale d'énergie.

2.1. Lien entre économie et énergie

L'économie classique considère que toute production, toute transformation d'inputs en outputs, est essentiellement fonction de la combinaison de deux facteurs, le capital et le travail. Dans cette approche économique classique, l'énergie n'intervient pas directement, elle n'est qu'un input comme un autre, lui-même produit par un autre secteur de l'économie. Ainsi,

le fonctionnement de l'économie est entièrement découplé des ressources naturelles puisque l'économie est sensée produire ses propres matières premières, issues du secteur minier par exemple. Dans la vision classique de la substituabilité, toute diminution d'un facteur de production (ou input) peut être compensée par l'augmentation d'un autre facteur (ou input). On en conclut naturellement que, en cas d'insuffisance, l'énergie pourrait être remplacée par autre chose, ce que dément la physique.

Il est vrai que l'univers est constitué de manière schématique d'énergie et de matière. Cependant, loin d'avoir un statut équivalent, l'énergie et la matière se complètent. L'énergie est l'élément physique qui anime la matière, la transforme, la met en mouvement. Tout changement d'état de la matière, toute transformation de la matière met en jeu de l'énergie. Pour couper, plier, chauffer, fondre, combiner chimiquement, soulever, accélérer, etc., c'est à dire pour effectuer toute transformation, il faut consommer de l'énergie. L'énergie mise en jeu est une mesure directe de l'ampleur de la transformation.

Pour une entreprise, produire des biens ou des services consiste à transformer certains inputs en outputs en leur ajoutant ainsi de la valeur. Il est logique que si aucune transformation n'est apportée aux inputs, pas même leur simple transport, il n'y a pas d'énergie consommée. Il n'y a également aucune valeur ajoutée et il sera délicat de revendre ce produit non transformé plus cher que son prix d'achat. La production étant une transformation, elle exige donc nécessairement de l'énergie et cette quantité d'énergie consommée, indispensable, reflète l'importance de la transformation réalisée. À l'imperfection d'efficacité énergétique près (voir section suivante), la valeur ajoutée réelle (corrigée de l'inflation) est simplement proportionnelle à l'énergie consommée. Sans énergie, pas de production. La (dé)croissance économique, mesurée par celle du PIB, et la (dé)croissance de la consommation de l'énergie vont donc de pair.

Pourquoi l'économie classique n'a-t-elle pas adopté ce point de vue de l'énergie au centre du processus de production ? Tout simplement parce que l'énergie primaire ne coûte rien, son prix est nul. Seuls comptent les coûts en capital et en travail qu'il faut consentir pour l'extraire de l'environnement. Au départ, l'état propriétaire de l'espace où se trouvent des ressources naturelles peut les consommer sans rien devoir à personne, sauf s'il a transféré tout ou partie de la propriété de cet espace à des personnes ou à des entreprises. La rente de Hotelling ne contredit pas cette idée, elle concerne un arbitrage par le propriétaire de la ressource entre son utilisation immédiate et son utilisation future. Tant que les contraintes sur les quantités de ressources énergétiques ne se faisaient pas réellement sentir, considérer que la production n'était déterminée (limitée) que par les quantités de capital et de travail ne posait que peu de difficulté. Mais une fois que la disponibilité de l'énergie a commencé à se restreindre, elle est apparue comme le carburant indispensable de l'économie, sans lequel capital et travail ne peuvent rien produire. Dans un contexte de restriction, c'est donc la contrainte sur l'énergie qui limite la production et, par conséquent le produit intérieur brut. Depuis des décennies, Robert Ayres et Benjamin Warr posent un regard pertinent sur cette question [Ayres 2009].

2.2. L'efficacité énergétique

Selon le point de vue économique, le débat sur le rapport entre énergie et économie s'exprime classiquement en termes d'efficacité énergétique et d'intensité énergétique du PIB. L'efficacité énergétique est mesurée par la quantité de valeur ajoutée (la contribution au PIB) qu'une unité d'énergie permet de produire. À l'inverse, l'intensité énergétique du PIB est la quantité d'énergie mise en œuvre par unité de PIB. Ainsi par exemple, si l'intensité énergétique pour la production d'acier est de 0,02 GJ/\$ (gigajoule d'énergie par dollar), l'efficacité énergétique, son inverse, est de 50 \$/GJ. Dans cette optique, pour que le PIB puisse croître exponentiellement (figure 1-a, courbe PIB) sans qu'il y ait besoin d'augmenter la consommation

d'énergie, le progrès technologique devrait permettre en parallèle une croissance exponentielle de l'efficacité énergétique ou, ce qui revient au même, une décroissance exponentielle de l'intensité énergétique. Chaque année, il faudrait par exemple 3% d'énergie en moins pour produire un bien ou service donné. On tendrait ainsi progressivement vers une production infinie sans aucune consommation d'énergie, ce qui est physiquement absurde.

Sans être nuls, les progrès réalisables sont assez limités. D'une part il existe dans tous les cas des limites physiques à la quantité minimale d'énergie nécessaire pour une production donnée, une tonne d'acier ou un kilowattheure d'électricité éolienne par exemple (figure 1-a, courbe efficacité énergétique). D'autre part, rentabilité oblige, les industriels ont réalisés des progrès considérables depuis un siècle qui ne laissent plus qu'un espace réduit pour les progrès futurs. Pour donner un exemple simple, si la quantité d'énergie pour produire un bien donné a été divisée par cinq depuis un siècle, il ne reste plus qu'une division par deux avant la limite physique qui, par essence, est inatteignable (figure 1-b). De plus, tous les progrès se font schématiquement à rendement décroissant, les progrès sont de plus en plus modestes tout en exigeant de plus en plus de temps et de travail de recherche.

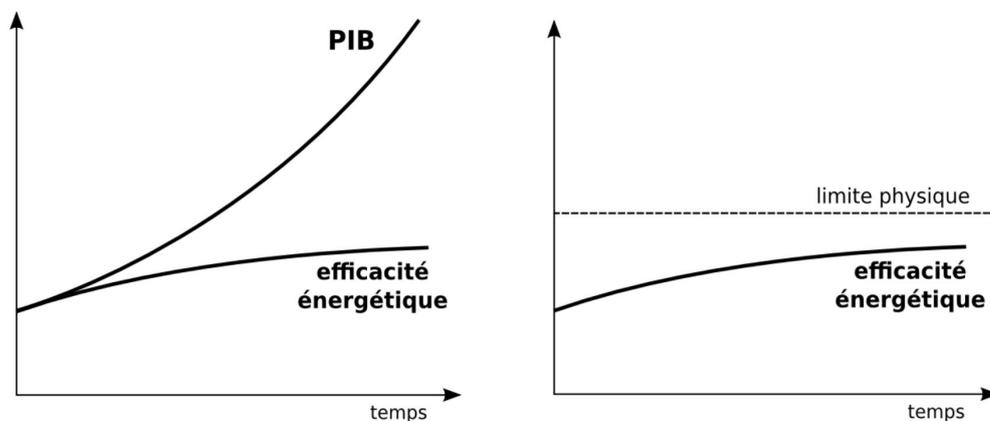


Figure 1: Evolution exponentielle du PIB et évolution asymptotique de l'efficacité énergétique (a, gauche) et comparaison de l'efficacité énergétique et de sa limite physique (b, droite).

Comme on peut le constater sur la figure 1-a, l'écart ne cesse de grandir au cours du temps entre une croissance économique exponentielle – habituellement considérée comme indispensable au fonctionnement harmonieux de nos sociétés – et l'augmentation asymptotique de l'efficacité énergétique. Jusqu'ici, c'est l'augmentation continue de la quantité globale d'énergie consommée qui a permis de combler cet écart grandissant. Cependant, dans une situation où la disponibilité d'énergie n'arriverait plus à croître, il n'y aurait plus moyen de combler cet écart et on assisterait à la fin du rêve dominant de toujours plus de production afin d'assurer un quasi plein emploi.

En résumé, le désaccord entre physique et économie porte sur le potentiel de progrès en matière d'efficacité énergétique (ou d'intensité énergétique). L'économie exige une croissance exponentielle de l'efficacité énergétique (c'est à dire avec des progrès croissants), la physique ne permet qu'une croissance asymptotique (c'est à dire avec des progrès décroissants).

Pour étayer les limites techniques à la décroissance de l'intensité énergétique, l'exemple du moteur à combustion interne est pertinent. Il est sans doute la machine thermique la plus populaire avec plusieurs centaines de millions d'exemplaires dans les voitures, les camions, les bateaux, etc. Les progrès semblent fulgurants ces dernières années avec des consommations au kilomètre qui diminuent constamment. Cette impression cache deux réalités importantes.

D'une part, le rendement des moteurs a fondamentalement peu progressé. D'autre part, les progrès à espérer sont bien plus faibles que ceux déjà acquis.

Les moteurs de bateaux illustrent très bien cette tendance. Dès 1912, le rendement thermique des moteurs (rapport entre énergie à l'arbre de l'hélice et l'énergie du carburant) atteignait 30%. Il s'agit là d'une mesure de l'efficacité économique de l'usage de l'énergie dans le transport maritime puisque ce rendement est une mesure du coût en énergie pour un service donné. Il peut *in fine* s'exprimer en \$/GJ. Aujourd'hui, le record s'établit à 54.4% précisément. Le gain a donc été de 24.4 points de rendement en un siècle, soit une consommation approximativement divisée par deux. Dans les prochaines décennies, l'objectif est d'atteindre 60% au prix du gigantisme des moteurs, tout comme celui des bateaux qui en sont équipés. En gardant le même rythme de croissance, ce qui est improbable, ce seuil ne sera atteint que vers 2040. La diminution de consommation associée sera cependant modeste, de l'ordre de 10%.

Concernant l'automobile, le premier moteur conçu par Diesel avait un rendement proche de 25%, fin du 19^{ème} siècle. Les voitures actuelles ont des moteurs Diesel ayant un rendement maximal un peu au delà de 40%. De nouveau, en considérant un rythme de croissance identique, les rendements resteront inférieurs à 50% en 2040. De nouveau le gain en intensité énergétique ne sera que de maximum 10% dans les décennies à venir.

Les moteurs sont un exemple emblématique mais sont loin d'être seuls à illustrer les développements qui ont déjà été réalisés et qui réduisent les marges de progrès dans le futur. Les éoliennes présentent également une même évolution. Le rendement est limité par le théorème de Betz qui dit qu'au maximum 60% (16/27) de l'énergie cinétique peut être récupérée par une éolienne. Aujourd'hui les meilleures éoliennes s'approchent d'un rendement nominal de 47%. Il est donc illusoire de vouloir doubler le rendement des éoliennes. Tout au plus, pourra-t-on espérer s'approcher de 55%, le gain marginal n'étant toujours que de 10% comme pour les moteurs.

Dans un tout autre domaine, les améliorations de l'efficacité dans le secteur de la production de ciment – production qui génère pas moins de 5 % des émissions mondiales de CO₂ – montrent un comportement analogue à celui illustré à la Figure 1-b, celui d'un progrès qui sature depuis bientôt 25 ans [Worrell 2008], voir figure 2.

La courbe du progrès technologique se présente donc comme une courbe croissante, s'approchant progressivement d'un maximum théorique qui ne pourra jamais être atteint (Figure 1-b et Figure 2). Son inverse, l'intensité énergétique est donc une exponentielle décroissante dont le seuil, qui représente le minimum d'énergie nécessaire pour réaliser une opération, n'est pas nul. Ce talon imposé par les lois de la physique est souvent négligé.

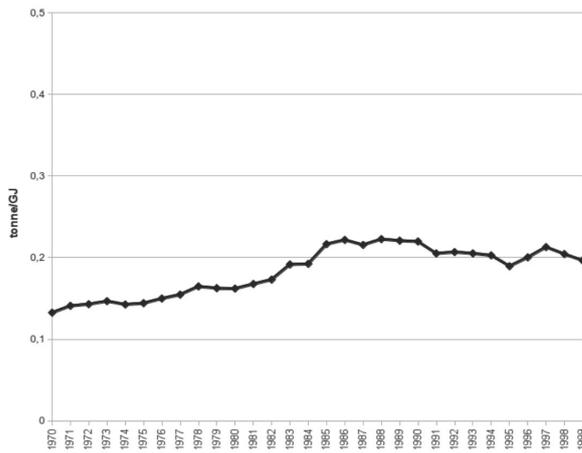


Figure 2 : Evolution temporelle de l'efficacité énergétique de la production du ciment exprimée en tonne de ciment par Gigajoule, adapté de Worrell [Worrell 2008].

La diminution de l'intensité énergétique ne permet pas à elle seule une croissance économique indéfinie à taux constant. Au contraire, les avancées déjà réalisées par la technique indiquent que les gains de ce type seront plutôt faibles dans le futur. Le découplage absolu (conjonction d'une croissance économique avec une décroissance de la consommation d'énergie) est donc impossible et un découplage relatif est une piste très limitée.

2.3. L'efficacité énergétique et la consommation d'énergie

Un autre constat historique vient également obscurcir le paysage de ceux qui prévoient qu'avec des équipements plus efficaces, la consommation d'énergie devrait spontanément se réduire. Ce constat est que les progrès réalisés dans le passé n'ont jamais coïncidé avec une diminution de la consommation d'énergie, globale ou *per capita*. Au contraire, ils ont toujours été concomitants avec une croissance de la consommation d'énergie. Cet effet bien connu, que ce soit sous le nom de paradoxe de Jevons, d'effet rebond ou de postulat de Khazzoom-Brookes, met en évidence le lien entre progrès technologique et croissance économique [Jenkins 2011]. Si le progrès permet une certaine diminution de la consommation d'énergie pour un bien ou service donné, cette économie est réinvestie avec profit dans une nouvelle croissance. C'est là un résultat de ce que Adam Smith a nommé la *main invisible* qui n'est que le résultat de la combinaison d'innombrables décisions individuelles, profitant du progrès pour réaliser de nouveaux projets. Si l'analyse économique contemporaine constate que la croissance stimule le progrès technique (croissance endogène), le progrès technique permet à son tour une nouvelle croissance (effet rebond). Et il en sera ainsi tant que des limites n'auront pas été rencontrées, que ce soient des limites choisies ou des limites subies, des limites exogènes ou des limites endogènes.

Une approche par un point de vue assez différent, partant du facteur travail, du productivisme et des gains de productivité, arrive au même constat de lien entre énergie et économie. Comme l'expose Jean Gadrey [Gadrey 2012], les gains de productivité sont la source majeure de la croissance économique des pays riches. En effet, ils permettent de produire une plus grande quantité de biens et de services avec la même force de travail. On notera au passage qu'un autre usage des gains de productivité aurait pu être la réduction du temps de travail. Gadrey précise plus loin que les fabuleux gains de productivité des Trente Glorieuses ont été fondés surtout sur une exploitation déraisonnable des ressources naturelles à commencer par les ressources énergétiques fossiles. Son raisonnement établit donc un lien très clair entre les ressources énergétiques et la croissance économique par le biais de la hausse

de la productivité. Et on pourrait faire un raisonnement assez analogue à partir du facteur de production qu'est le capital. Finalement, travail et capital sont des facteurs nécessaires à la mise en œuvre d'énergie pour effectuer la transformation de matières premières en produits finis. Chacun de ces trois facteurs est tout aussi indispensable à l'économie que les deux autres [Ayres 2009].

2.4. L'illusion de la décroissance de l'intensité énergétique

Les partisans du découplage absolu mettent régulièrement en avant la diminution de l'intensité énergétique constatée ces dernières décennies dans différents pays, principalement ceux les plus fortement développés. Ce constat est indéniable, l'intensité énergétique ayant été approximativement divisée par deux ces 50 dernières années dans les pays de l'OCDE [Wing 2008]. Il serait donc possible de s'affranchir partiellement de la contrainte entre économie et énergie.

Les causes de cette décroissance sont âprement discutées. En cause, la difficulté qu'il y a à décomposer la diminution de l'intensité énergétique en ses différents facteurs : progrès technologique, dont nous avons vu les limites ci-avant, spécialisation sectorielle ou sous-sectorielle, modifications dans le choix des matières premières ou des produits, etc.

La spécialisation sectorielle ou sous-sectorielle ouvre la possibilité pour un État de sélectionner les secteurs ou sous-secteurs les moins intensifs en énergie tout en externalisant les productions les plus énergétivores (et donc de les émissions de CO₂ associées [Davis 2010]). Développer le secteur des services (la finance par exemple) en cédant une partie de la production industrielle lourde (la sidérurgie par exemple) modifie à la baisse l'intensité énergétique nationale. De même, se concentrer sur la production électrique d'acier à partir de mitraille en remplacement de celle à partir de minerais de fer transformé en fonte dans un haut-fourneau (toutes deux aussi indispensables l'une que l'autre) permet de réduire sensiblement l'intensité énergétique du secteur sidérurgique national [Eichhammer 1997]. Dans les deux cas, il est évident qu'il faut en contrepartie qu'un autre État, le plus généralement parmi ceux en développement, se spécialise dans les secteurs et sous-secteurs les plus énergétivores. Ces spécialisations sont bien sûr sans effet sur l'intensité énergétique mondiale.

Le choix des matières premières peut aussi avoir une influence non négligeable sur l'intensité énergétique d'une industrie. Par exemple, la production d'électricité à partir du gaz est, à contenu énergétique équivalent, potentiellement plus efficace que celle à partir du charbon. Il n'en reste pas moins vrai que les ressources mondiales en gaz sont insuffisantes pour qu'il soit possible de simplement transformer toutes les centrales au charbon en centrales au gaz. D'ailleurs, on peut constater que la majorité des nouvelles centrales en construction aujourd'hui dans le monde sont des centrales au charbon. Cela s'explique essentiellement par sa plus grande disponibilité par rapport au gaz, malgré son moins bon rendement et ses effets plus négatifs sur le climat. D'autres exemples de substitutions de matières premières peuvent être cités tels celui de la production d'aluminium (Al) à partir d'alumine (Al₂O₃) importée plutôt qu'à partir de minerai de bauxite ou encore celui de la production de papier à partir de pulpe importée. Dans tous les cas, l'intensité énergétique diminue car la composition des inputs a été modifiée, en général grâce à l'importation de matières premières déjà pré-transformées ailleurs.

Dans la réalité, les nouveaux progrès en efficacité énergétique ne sont pas mis en œuvre simultanément dans toutes les entreprises d'un secteur donné. Ils s'étalent dans le temps. À un moment donné coexistent différents producteurs ayant chacun atteint un certain niveau d'efficacité par rapport au meilleur état de l'art dans ce domaine et à cet instant. Un rattrapage progressif se produit, avec parfois certaines périodes d'accélération comme celle qu'ont connue

récemment les ex-pays soviétiques qui ont rejoint l'Union européenne. Il y a donc là un réel gisement d'amélioration de l'efficacité énergétique, comme ne manquent pas de le souligner diverses études [IPCC 2011][Teske 2010]. Il faut cependant souligner ici trois dimensions souvent négligées par les méthodologies utilisées pour ces études.

Tout d'abord, ce phénomène de rattrapage technologique a existé de tout temps. Il ne s'agit pas là d'une idée nouvelle qui viendrait d'être découverte. Et force est de constater qu'il n'a jamais correspondu à une diminution de la consommation globale d'énergie, que du contraire. Le rattrapage technologique fait simplement partie du BAU (business as usual) et il est bien sûr l'objet du phénomène d'effet rebond évoqué ci-avant. Considérer les conséquences des progrès futurs tout en négligeant celles des progrès passés constitue à nos yeux une erreur méthodologique.

En deuxième lieu, le rattrapage technologique est un processus lent. Au même titre qu'il paraît irréaliste que toutes les habitations d'Europe deviennent passives dans 10 ans ou dans 30 ans, il est irréaliste que toutes les usines soient rapidement modernisées. De plus, l'obsolescence toujours plus rapide de l'outil industriel ne peut qu'être un facteur de croissance supplémentaire comme l'est aujourd'hui celle des équipements de télécommunication.

Enfin, calculer la consommation globale d'énergie en 2050 avec l'hypothèse que tous les équipements et outils de production soient alors presque parfaitement efficaces, volonté politique oblige, et en déduire que l'on peut ainsi découpler la croissance économique de celle de la consommation d'énergie n'est, si l'hypothèse est réaliste, que temporairement vrai. Une fois le rattrapage technologique effectué, le couplage habituel entre économie et énergie recommencera à faire dépendre la croissance économique de celle de la croissance de la consommation d'énergie. Généralement, les études prospectives s'arrêtent lorsque leur objectif d'efficacité énergétique optimale est atteint, souvent en 2030 ou 2050. La mise à niveau généralisée des processus de production ne peut constituer un moyen de découplage structurel entre économie et énergie et donc assurer une croissance structurelle de l'économie sans augmentation de la consommation d'énergie. Il s'agit tout au plus d'une stratégie conjoncturelle mais en aucun cas d'un nouveau paradigme, d'une nouvelle économie, affranchie de la contrainte énergétique.

3. Transformer l'économie

Poursuivre une croissance économique continue, sans disposer de quantités croissantes d'énergie et avec les modestes gains d'efficacité exposés ci-dessus, représente une véritable gageure. À défaut d'une réponse technique satisfaisante, il reste à examiner les possibilités de transformer l'économie elle-même. Peut-on améliorer le fonctionnement de l'économie sans devoir transformer la société ? Il s'agit pour cela d'analyser la structure de l'économie afin d'évaluer les possibilités de développement d'activités peu dépendantes de l'énergie et de restriction de celles qui le sont plus, de manière à assurer, au total, une croissance économique exponentielle indéfinie tout en restant dans une économie libérale guidée par la main invisible.

3.1. L'augmentation de la qualité des produits

Conscients de la finitude des ressources naturelles et de l'impact négatif de la production économique classique sur l'environnement, certaines propositions plaident pour le passage d'une économie de la quantité à une économie de la qualité. Ce ne serait ainsi plus la croissance des quantités produites qui assurerait la croissance du PIB mais bien celle de la qualité des produits et des services.

Ceci implique non seulement l'hypothèse assez naturelle que la qualité d'un produit ou service puisse toujours être augmentée, sans que la quantité des inputs nécessaires à sa production n'augmente, mais aussi celle, plus problématique, que cette hausse de la qualité s'exprime dans une hausse exponentielle du prix réel du produit ou service, permettant ainsi la hausse exponentielle du PIB. En d'autres termes, qu'à la hausse de qualité corresponde une hausse de la valeur économique réelle.

Pour atteindre cet objectif, il faut que la hausse de qualité ne consiste pas en une complexification du produit car cela impliquerait une plus grande consommation d'énergie, en raison du second principe de la thermodynamique. Il ne faut pas non plus qu'elle consiste à remplacer des matières premières courantes par des matières premières plus rares (limitées) [Bihoux 2010] car leur rareté entraverait la croissance. Seule l'augmentation de qualité sans augmentation ni de matières premières ni de complexité est compatible avec une consommation stable des ressources naturelles.

Cependant, si la production d'un bien ou d'un service de meilleure qualité n'exige pas une plus grande quantité d'inputs (matière et/ou énergie), ni des facteurs de production (capital et/ou travail), pourquoi le prix de ce bien (à l'équilibre du marché) devrait-il croître ? En situation de concurrence suffisante et une fois amortis les coûts de recherche et développement, le prix du produit ou service devrait se situer au niveau du coût marginal de production, c'est-à-dire au coût des inputs et des facteurs de production. Dans un marché concurrentiel, une hausse de qualité pure ne devrait donc pas s'accompagner d'une hausse durable du prix réel (hors inflation). C'est d'ailleurs ce que l'on constate actuellement dans le secteur innovant par excellence, celui des technologies de l'information et de la communication (TIC).

Si donc la hausse de qualité ne correspond pas à une hausse de quantité, comment peut-on l'évaluer ou la mesurer ? Plutôt que de qualité, les économistes parlent de l'utilité d'un produit ou service et considèrent que celle-ci peut être mesurée par le prix que le marché attribue au produit ou service. Mais alors se pose la question de séparer dans les variations de prix ce qui correspond à un changement de valeur réelle de ce qui n'est que de l'inflation. Dans la pratique, déterminer la valeur économique réelle (hors inflation) d'un produit ou service représente un véritable défi pour les statisticiens.

Faire la distinction entre croissance économique et inflation (ou déflateur du PIB) a toujours été un problème particulièrement délicat [Triplett 2004]. Comment évaluer la qualité d'un nouveau produit plus cher qu'un autre du même type, voire un produit d'un type entièrement nouveau ? La plupart des méthodes statistiques préconisent, si les différences ne sont pas trop faibles, de considérer que la différence de prix entre deux produits de même type mais de qualités différentes reflète bien une différence de valeur réelle et ne correspond donc pas à de l'inflation.

Pour beaucoup de produits dont la qualité varie peu ou lentement (une pomme, un crayon, etc.) cette méthode est considérée comme satisfaisante. Par contre, pour des produits en évolution technologique rapide (les TIC par exemple) beaucoup d'organismes statistiques utilisent aujourd'hui un autre outil : les fonctions hédoniques. Ce sont des fonctions mathématiques qui permettent de déterminer le prix théorique d'un produit en fonction de ses caractéristiques, communiquées par le fabricant : vitesse, puissance, fonctions diverses, etc. Ce prix théorique représente la valeur réelle du produit et la différence entre ce prix théorique et le prix effectif représente l'inflation. L'usage par les statisticiens de fonctions hédoniques pour évaluer la qualité des nouveaux produits met bien en évidence le sens qu'il faut donner au mot qualité lorsque l'on parle de croissance économique. Il s'agit bien ici d'une augmentation de certaines grandeurs physiques qui correspond généralement à de plus grandes quantités et/ou à une plus grande complexité.

Il apparaît donc justifié de considérer que la hausse exponentielle du PIB ne peut être entretenue que par une hausse de qualité du produit final liée à une augmentation exponentielle des quantités d'énergie ou de matières premières utilisées pour la production du produit.

3.2. La dématérialisation

Une autre proposition courante envisage de remplacer une partie croissante de la production matérielle par de la production immatérielle afin de pouvoir maintenir la croissance économique exponentielle sans qu'il y ait croissance de la consommation matérielle. Il s'agit de rendre les biens et services virtuels évitant de ce fait une consommation d'énergie associée à la production (transformation) de biens réels. Si l'on entend régulièrement parler du concept de dématérialisation dans les discours tournant autour du développement durable, la mise en œuvre pratique de ce concept semble ne trouver à s'appliquer que dans le seul domaine du remplacement des documents papier par des documents électroniques. Le développement des technologies de l'information et de la communication semble ainsi être une piste prometteuse et exemplative de la dématérialisation. La généralisation de l'utilisation de l'informatique devrait mener à une économie basée sur une réalité virtuelle peu consommatrice d'énergie. Plus d'internet, plus de stockage en ligne, etc. impliquent moins de papier et donc une consommation d'énergie et de matière moindre pour un service équivalent.

Cependant cette hypothèse d'une dématérialisation de l'économie n'est pas confirmée par les faits. En même temps que les TIC se développaient, la consommation de papier a crû plus vite que le PIB. Entre 1991 et 2004, le PIB européen a crû de 25% tandis que la consommation de papier a crû de 40% [Empirica 2006]. Sans que l'on puisse établir un lien de cause à effet, il se pourrait que l'accès à beaucoup plus d'information entraîne qu'une plus grande quantité d'information se retrouve sur du papier. Il n'y aurait donc pas de découplage absolu entre quantité d'information électronique et quantité d'information papier.

La dématérialisation de l'information reste donc actuellement un concept largement hypothétique. De plus, loin d'être neutre énergétiquement, les TIC nécessitent de nombreuses infrastructures et consomment beaucoup d'énergie électrique. Tous les équipements liés à l'information et à la communication ont consommé 8% de l'électricité mondiale en 2007 [Pickavet 2008], soit 2.6% de la consommation énergétique primaire mondiale. On est loin d'une dématérialisation réelle de l'économie qui reste un mythe actuellement.

Bien que cet exemple ne puisse avoir force de loi physique, il reste interpellant car autant il est simple de rendre virtuel un livre ou une facture, autant il est complexe de faire de même avec une habitation, un véhicule ou des vêtements sans affecter la structure de l'économie.

3.3. Structure de l'économie

En dehors de l'examen de stratégies particulières comme celles de l'*économie de la qualité* ou de la *dématérialisation*, la transformation de l'économie peut être envisagée plus globalement par une analyse sectorielle. Poursuivre la croissance économique avec moins d'énergie serait-il possible en passant à une nouvelle économie, moins matérielle, moins énergétique ? Sous cette proposition se retrouve posée la question de la structure de l'économie. Un système économique est composé de multiples secteurs et sous-secteurs dont l'activité collective permet de fournir l'ensemble des biens et services consommés par les êtres humains. Que l'on songe par exemple aux multiples réseaux qui nous permettent de nous déplacer en voiture, train (toujours plus rapides) ou avion, de transporter tout ce que nous acquérons. Que l'on songe aux réseaux qui nous alimentent en eau ou en électricité, à ceux qui nous permettent de communiquer, de correspondre et de nous informer, par ondes, câbles ou fibres. Ces réseaux eux mêmes n'existent que grâce aux produits des industries des

métaux (la sidérurgie par exemple) et de celles des minerais non-métalliques, industries qui elles-mêmes dépendent des industries extractives (mines, puits). Que l'on songe au secteur de la santé, aux hôpitaux, aux véhicules de secours aux appareils d'imagerie médicale, tous dépendant à leur tour d'autres secteurs de l'économie. C'est probablement dans le secteur de l'alimentation humaine qu'il est le plus facile d'imaginer des modifications structurelles.

La question qui se pose est de savoir dans quelle mesure la structure de l'économie peut être modifiée, si elle est plutôt rigide ou plutôt souple. Peut-on assurer une croissance économique tout en consommant moins d'énergie par le développement des secteurs économiques peu intensifs en énergie et par la réduction de taille – absolue et pas seulement relative – des secteurs les plus intensifs? Est-ce que la consommation humaine peut continuer à se développer dans une économie en croissance tout en consommant moins de matière et d'énergie? Le proverbe dit *Qui dort dîne*. Mais peut-on réellement remplacer de la nourriture par du sommeil et dans quelle mesure? Les deux besoins ne sont-ils pas l'un et l'autre indispensables?

Pour la théorie économique, il s'agit d'un problème de substitution. Peut-on remplacer une consommation de biens intensifs en énergie par une consommation jugée tout aussi utile de biens ou de services peu consommateurs d'énergie. Assurer simultanément la croissance économique et la décroissance de la consommation d'énergie? Certaines fonctions dans la théorie économique envisagent que la substitution soit toujours possible entre deux produits différents. C'est le cas de la fonction de Cobb-Douglas, très utilisée en économie (figure 3-a). Avec une fonction de ce type, il est toujours possible de remplacer un produit qui viendrait à faire défaut par un autre produit, fut-ce en quantité très importante, tout en conservant la même utilité globale. À l'opposé, la fonction de Leontieff n'offre aucune possibilité de substitution, aucun supplément d'un produit ne peut compenser un manque de l'autre produit, chacun des deux est indispensable (figure 3-b).

Dans la réalité, on peut penser qu'une certaine marge de manœuvre existe dans le voisinage de l'état d'équilibre actuel mais que cette marge est rapidement limitée (figure 3-c) [Ayres 2009]. Pratiquement toute activité économique qui contribue au PIB exige des bâtiments, des infrastructures, des réseaux, des équipements et des machines. Ceux-ci, à leur tour, exigent des matériaux de base, aciers, métaux et non-métaux ainsi que de l'énergie pour les transformer. Dans la réalité, le développement de l'activité humaine ne saurait se passer ni du développement des réseaux de communication ni de ceux de l'énergie (en particulier de l'énergie électrique), entraînant ainsi tous les secteurs de l'économie. Que ce soit la route, le rail, Internet ou la téléphonie, il en a toujours été ainsi. Affecter un secteur, en le réduisant par exemple, nécessite de revisiter l'ensemble des autres secteurs et donc la structure de l'économie et plus largement celle de nos sociétés.

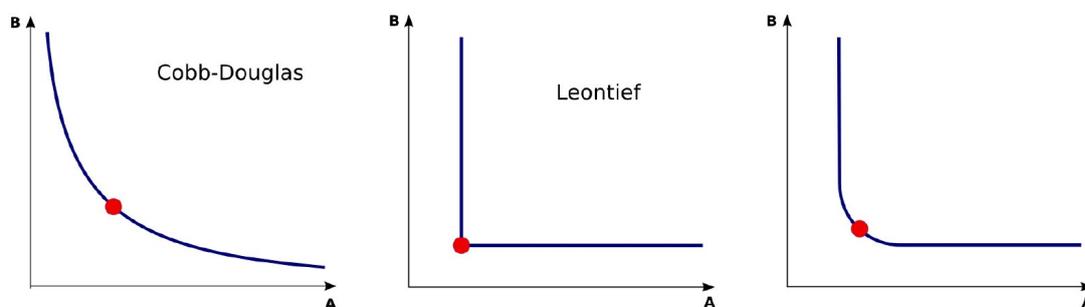


Figure 3 : Illustration de la substitution d'un produit ou service par un autre, à utilité équivalente : (a – gauche) substitution classique, (b – milieu) substitution impossible, (c – droite) substitution limitée.

4. Conclusions

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons tenté de développer les arguments qui établissent que ni des transformations technologiques ni des transformations structurelles de l'économie ne permettront de poursuivre sur le chemin de la croissance économique. C'est bien à une transformation du fonctionnement global de la société qu'il faut s'attendre, de gré ou de force, même si les voies que cette transformation empruntera n'apparaissent pas encore clairement.

L'interrogation qui sous-tend tout cet article porte sur l'adéquation de l'économie capitaliste et libérale avec les contraintes physiques planétaires [Lebeau 2008], avec une poursuite non catastrophique de l'histoire de l'humanité. Il s'agit moins ici d'une interrogation idéologique que d'un questionnement physique sur la compatibilité entre les activités humaines et les limites de la biosphère.

L'économie est capitaliste dans la mesure où elle tolère ou encourage l'accumulation de biens. Depuis le 18^{ème} siècle, les sociétés occidentales sont passées d'une économie de subsistance à une économie d'accumulation, le tabou de la chrématistique ayant été levé par les lumières [Cassiers 2011]. L'économie est libérale en ce sens qu'elle place la liberté individuelle avant le projet collectif, misant avant tout sur le succès de la *main invisible*. Même en l'absence de considérations idéologiques, chacun de ces deux modes de fonctionnement pose un problème de compatibilité avec les limites de la planète.

Le double constat, de plus en plus évident, que les ressources énergétiques mondiales ne sauraient plus croître [Jancovici 2011] et que le couplage entre économie et énergie est physiquement incontournable [Ayres 2009] nous permet d'anticiper un avenir dans lequel la croissance économique ne sera même plus une option. L'évolution de l'économie mondiale commence à montrer la justesse du raisonnement des auteurs des limites de la croissance [Meadows 1972]. Et si la croissance économique a jusqu'ici permis à une bonne partie de l'humanité de subvenir à ses besoins, en permettant une situation de quasi plein emploi, ce ne sera probablement plus le cas à l'avenir. D'autres modes de répartition du travail, des biens et des ressources naturelles doivent encore être imaginés. Quels sont les modes de gouvernement des sociétés qui permettent à chaque être humain d'obtenir dignement un revenu décent, et de subvenir ainsi à ses besoins, dans un contexte de stagnation (de réduction?) de la production et de la consommation?

Pour terminer, il faut ajouter et souligner que les réflexions contenues dans cet article ne doivent pas être isolées de la réflexion globale, interdisciplinaire, mais doivent bien participer au débat général. La réflexion philosophique, celle sur les valeurs, est tout à fait naturelle, légitime et nécessaire car elle s'interroge sur la finalité de toute activité humaine. La littérature sur cette très vaste question est d'ailleurs abondante, tant en sociologie qu'en philosophie [Jonas 1979] [Hösle 1991].

Bibliographie

- [Ayres 2009] Robert U. Ayres & Benjamin Warr, *The Economic Growth Engine - How Energy and Work Drive Material Prosperity*, 2005.
- [Bihouix 2010] Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *Quel futur pour les métaux ?*, 2010.
- [Cassiers 2011] Isabelle Cassiers et al., *Redéfinir la prospérité*, 2011.
- [Davis 2010] Steven J. Davis and Ken Caldeira ; Consumption-based accounting of CO₂ emissions ; PNAS March 23, 2010 vol. 107 no. 12 5687-5692.
- [Eichhammer 1997] W. Eichhammer and W. Mannsbart; Industrial energy efficiency – Indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry; *Energy Policy*, Vol. 25, Nos 7-9, pp. 759-772, 1997.
- [Empirica 2006] Empirica, *ICT and e-business in the pulp, paper and paper products industry, e-business watch Sector Report No. 3*, European Union 2006.
- [Gadrey 2012] Jean Gadrey, *Adieu à la croissance*, 2012.
- [Hösle 1991] Vittorio Hösle, *Philosophie de la crise écologique*, 2011.
- [IPCC 2011] IPCC, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2011.
- [Jancovici 2011] Jean-Marc Jancovici, *Changer le Monde – Tout un programme !*, 2011.
- [Jancovici 2012] Jean-Marc Jancovici, *Qu'est-ce que l'énergie, exactement ?*, 2012, <http://www.manicore.com/documentation/energie.html>.
- [Jenkins 2011] Jesse Jenkins, Ted Nordhaus and Michael Schellenberger, *Rebound & backfire: a review of the litterature*, 2011.
- [Jonas 1979] Hans Jonas, *Le Principe de Responsabilité*, 2008.
- [Lebeau 2008] André Lebeau, *L'enfermement planétaire*, 2008.
- [Meadows 1972] D.H. Meadows, J. Randers, D.L. Meadows, W.W. Behrens, *The Limits to Growth*, 1972.
- [Pickavet 2008] M. Pickavet et al., Department of Information Technology (INTEC) of Ghent University; *Worldwide Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking* ; IEEE ANTS 2008 conf., 15-17 December 2008, Bombay (India).
- [Teske 2010] Sven Teske et al., *Energy [r]evolution. Towards a fully renewable energy supply in the EU 27, EREC – Greenpeace*, 2010.
- [Triplett 2004] Jack E. Triplett, *Handbook on Hedonic Indexes and Quality Adjustments in Price Indexes: Special Application to Information Technology Products*, 2004.
- [Wing 2008] Ian Sue Wing; Explaining the declining energy intensity of the U.S. Economy; *ressource and energy economics*, 30 (2008) 21-49.
- [Worrell 2008] Ernst Worrell and Christina Galitsky ; *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making ; An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*, March 2008.

Loi, innovation variétale et diversité biologique

Caroline KER¹

Université de Namur

Introduction

Depuis deux décennies, les interpellations du monde scientifique et de la communauté internationale quant à l'importance de la biodiversité pour l'agriculture se sont multipliées. Il en est ainsi notamment à l'égard de la perte de biodiversité cultivée et des périls que cela fait courir à la durabilité de notre modèle agricole et à la sécurité alimentaire. A cet égard, ces voix promeuvent notamment la conservation « in situ » ou « à la ferme » des ressources phyto-génétiques pour l'agriculture et l'alimentation, ainsi que les pratiques agricoles reposant sur la diversité biologique (voy. par exemple : IAASTD, 2008 ; De Schutter, 2010; FAO, 2010; PAR, 2011).

Dans une première partie, nous rappellerons quelques-uns des atouts de la biodiversité phyto-génétique pour la production agricole et la sécurité alimentaire (I.a.). Nous évoquerons ensuite les effets qu'ont sur la diversité cultivée, la standardisation de la production agricole et l'adaptation des variétés végétales à cette standardisation, (I.b.). Face aux écueils de la standardisation agricole, nous présenterons les atouts de la diversification des ressources phyto-génétiques cultivées. Nous évoquerons ensuite les variétés traditionnelles et paysannes ainsi que l'intérêt qu'elles présentent pour l'objectif de conservation de la diversité agricole, notamment dans le cadre de l'alternative proposée par l'agroécologie (I.c.).

La deuxième partie évoquera la marginalisation de ces variétés par l'agriculture moderne et leur conséquente disparition notamment. A cet égard, après avoir évoqué la nature systémique de ce phénomène de standardisation à l'oeuvre dans l'agriculture moderne, nous étudierons plus spécifiquement la contribution de la réglementation européenne sur les variétés végétales à ce phénomène. Serons abordées à cet égard, la réglementation européenne sur le catalogue des variétés (II.a) et le droit de la propriété intellectuelle (II.b.).

La dernière partie sera consacrée aux initiatives de transition. L'évocation de projets sur les variétés paysannes et la conservation à la ferme de la diversité agrobiologique permettra d'illustrer les complémentarités de cette approche avec la recherche scientifique sur les variétés et la conservation de semences des plantes dans des banques de gènes (III.a). Nous énumérerons et apprécierons ensuite quelques-unes des initiatives réglementaires visant à réhabiliter des variétés traditionnelles et/ou le travail de conservation à la ferme (III.b.).

Enfin, nous concluons.

I. Standardisation de l'agriculture, agroécologie, et variétés végétales traditionnelles conservation à la ferme

I.a. Les bienfaits de la biodiversité pour l'agriculture et l'alimentation

Le rôle joué par les ressources génétiques végétales dans la sécurité alimentaire, et l'intérêt

¹ Chercheuse au Centre de Recherche Information, Droit et Société, Université de Namur

de cultiver et de conserver la diversité « à la ferme » qu'elles constituent, sont reconnus à maints égards. La diversité des ressources phyto-génétiques pour l'agriculture et l'alimentation procède du travail de domestication effectué par les cultivateurs sur les plantes sauvages depuis les débuts de l'agriculture. Aux côtés de plantes sauvages, les plantes traditionnelles et des variétés paysannes constitue le portefeuille génétique au départ duquel nos variétés modernes de plantes agricoles (et donc notre alimentation) ont été développées. Aujourd'hui encore, ces plantes fournissent un pool de solutions à la sélection moderne des plantes, pour la recherche de gènes de résistance à des pathogènes ou pour l'adaptation à de nouvelles conditions climatiques, par exemple (Brush, 1994 ; Thrupp, 1998). La biodiversité est aussi un atout pour une production agricole efficace grâce aux fonctions biologiques et services écologiques qu'elle habilite, telles que les synergies et complémentarités entre les plantes, qui supportent la production agricole. Au niveau de l'« exploitation agricole », la diversification des cultures fournit une alternative aux engrais minéraux et pesticides, alors que l'uniformité qui caractérise notre l'agriculture moderne est pointée comme un facteur important de sa vulnérabilité, contribuant à en renforcer la dépendance aux intrants (Altieri, 1999 ; PAR, 2011). Aux côtés des services que les plantes peuvent se rendre les unes aux autres, la diversification des plantes cultivées permet en effet de sécuriser la production, toutes les plantes n'étant pas exposées de la même manière aux pathogènes ou aux aléas climatiques. La diversité a donc à ce titre une fonction d'assurance et de stabilisation des rendements (Swanson et al. 1994; PAR, 2011). Enfin, la conservation de la biodiversité « au champ », via la diversification de l'agriculture notamment, permet l'adaptation continue des ressources génétiques végétales à des environnements changeants, et d'offrir ainsi à la recherche moderne de nouvelles ressources génétiques ayant co-évolué avec leur environnement, notamment les modifications climatiques (ce qui n'est pas le cas des ressources conservées « ex situ », généralement dans des banques de semences. Inversement la faible diversité des systèmes agricoles modernes est pointée comme un facteur limitant leur capacité d'adaptation aux changements climatiques (Altieri et Merrick, 1987 ; Pimbert, 2011).

I.b. Agriculture moderne, variétés « modernes », et perte de diversité agricole

Bien que les outils pour une évaluation rigoureuse, à l'échelle globale, de la diversité génétique des ressources phyto-génétiques agricoles manquent encore en partie, la FAO ainsi que d'autres cercles scientifiques témoignent de la perte de diversité biologique dans l'agriculture (Fowler et Mooney, 1990 ; FAO, 2010 ; CGRFA, 2011; Goffaux et al., 2011). Ainsi, selon la FAO, 75% de la biodiversité agricole ont été perdus durant le 20ème siècle, suite à l'industrialisation de l'agriculture (FAO, 1996).

Parmi les causes de cette perte de diversité, sont pointés l'utilisation et le déploiement des variétés modernes qui sont issues de la sélection professionnelle, et des techniques agricoles modernes liées à l'intensification de la production. En Europe et dans les pays développés plus particulièrement, ces variétés modernes se sont largement substituées aux variétés « traditionnelles » ou « paysannes »², qui se sont en conséquence progressivement raréfiées ou ont disparu³ (Swanson et al., 1994 ; UNEP, 1995 ; Millenium Ecosystems Assessment, 2005; Veteläinen et al., 2009). Les variétés modernes ont en effet l'avantage productif d'être caractérisées par un phénotype fixe et déterminé et d'être homogènes, ce qui est rendu possible par les techniques de la sélection variétale professionnelle. Ces variétés assurent ainsi à l'agriculteur un comportement déterminé et identique pour toutes les plantes. L'homogénéité facilite dès lors la systématisation de la production et des traitements, y compris la mécanisation

2 Nous reviendrons sur ces concepts plus loin.

3 Le même constat est actuellement fait dans les pays du sud (FAO, 2010).

de l'agriculture (Swanson et al., 1994 ; Mazoyer et Roudart, 2002 ; Bonneuil et Thomas, 2009). L'uniformisation des cultures est un trait de la stratégie de l'agriculture moderne, et le recours aux intrants, qui permet de contrôler et de neutraliser les effets de l'environnement de culture, complète cette stratégie (Bonneuil et Thomas, 2009). L'uniformité offre ainsi à l'agriculture moderne la prédictibilité, les économies d'échelle, la production de masse, et la rentabilité qui s'en suit plus facilement (Swanson, 1994). Ensemble, ces différentes composantes techniques de l'agriculture moderne ont permis un déploiement sans précédent de la production alimentaire durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (IAASTD, 2008).

En dépit de ces réalisations, l'agriculture productiviste est aujourd'hui incriminée pour sa gourmandise en intrants, engrais, pesticides, eau et pétrole. Or, le modèle qui caractérise les variétés modernes n'est pas étranger à cela. Les variétés modernes sont généralement conçues pour convenir à de nombreux lieux différents de production, approche qui se complète du contrôle et de la « neutralisation » des effets de l'environnement grâce au recours aux intrants. Afin d'assurer la prévisibilité du comportement des plantes, la sélection moderne met ainsi généralement au point des variétés caractérisées par des interactions Génome x Environnement limitées (c'est-à-dire pour une influence faible de l'environnement sur les performances de la variété) (Desclaux, 2005). Si elles présentent dès lors de bonnes performances dans des conditions de production à forts intrants, elles sont nettement moins efficaces dans l'agriculture à bas-intrants, dans des conditions de productions difficiles ou marginales (FAO, 2010). Une alternative mise en avant notamment par les rapports que nous avons évoqués, consisterait au contraire à exploiter la diversité génétique des ressources phyto-génétiques et leurs interactions avec l'environnement, et de miser ainsi sur leur adaptation à des environnements particuliers ou à des conditions de productions différentes (Ceccarelli et al., 2001 ; Lammerts van Bueren et al., 2010) . On substituerait ainsi au moins pour partie aux inputs et à la standardisation des environnements qu'ils opèrent, une meilleure adaptation de la plante à son environnement, ce qui présenterait aussi l'avantage de conserver « in situ » une plus grande diversité de plantes (Altieri, 1999 ; PAR, 2011).

Parmi les facteurs de la diminution de la diversité cultivée qui sont liés aux variétés modernes de plantes, on pointe également l'amenuisement de la distance génétique entre les différentes variétés mises au point par la recherche, nombreuses variétés étant issues des mêmes lignes parentales (FAO, 2010 ; Serpolay et al., 2011).

Enfin, a également été relevée la concentration de la recherche privée sur les quelques plantes agricoles les plus importantes, ce qui constitue également en soi un facteur de perte de diversité cultivée (FAO, 2010 ; PAR, 2011). Ainsi, à ce jour, seules trois plantes (riz, blé, maïs) fournissent 60% des calories, et 95 % de la consommation est fournie par environ trente plantes agricoles (Source : FAO, <http://www.fao.org/biodiversity/components/plants/en/>).

I.c. L'alternative agroécologique et l'intérêt des variétés traditionnelles et de la conservation à la ferme

Alors que la croissance démographique et l'augmentation des niveaux de vie mettent la production agricole au défi, il est relevé qu'un accroissement de celle-ci ne pourra se réaliser en appliquant les mêmes stratégies d'intensification que celles mises en œuvre actuellement par l'agriculture productiviste. Cela impliquerait un accroissement proportionnel des intrants, qu'il s'agisse des engrais minéraux et des pesticides, mais également de l'eau, du pétrole et des richesses du sol, stratégie qui n'est pas soutenable (PAR, 2011). Déjà, en de nombreux endroits du globe, les rendements agricoles stagnent ou ont amorcé un déclin en raison de la dégradation des conditions environnementales (FAO, 2010).

A cet égard, l'agroécologie propose une stratégie alternative pour la production agricole dont une des idées maîtresses est de miser sur les ressources internes à l'écosystème agricole (activité biotique du sol, recyclage de la biomasse, agroforesterie, couplage bétail-culture, variétés adaptées...) et diminuer ainsi la dépendance aux intrants extérieurs. Un aspect de cette stratégie consiste à favoriser la diversité et l'adaptation locale de plantes cultivées ou naturellement présentes, afin de favoriser les complémentarités et synergies entre elles, leurs performances, leurs dépendance aux intrants, ainsi que l'autonomie de l'agriculteur qui se trouve dès lors moins dépendant de fournisseurs extérieurs de ressources et de technologies, tel que le secteur semencier (Altieri, 1999). Cette approche holistique de l'agriculture, dont les rapports précédemment évoqués se sont faits l'écho, prend le contre-pied du modèle productiviste qui mise sur l'amélioration de la plante au lieu de l'ensemble du système agricole (Vanloqueren et Baret, 2009), et tente de faire la synthèse entre la production, les composantes de l'environnement, et le facteur humain.

L'intérêt des variétés dites « locales », « traditionnelles » ou « paysannes »⁴ et le danger lié à leur disparition progressive (CGRFA, 2011) prennent donc tout leur sens dans ce contexte. Ces variétés font ainsi généralement l'objet d'une domestication par les agriculteurs et d'un façonnage par l'environnement et la sélection naturelle (Brush, 1994). Contrairement aux variétés modernes, elles sont caractérisées par une grande hétérogénéité et une adaptation au milieu avec lequel elles poursuivent leur évolution. Comme nous le verrons plus loin au travers de divers exemples, ces caractéristiques en font aujourd'hui l'objet de l'intérêt de certains agriculteurs biologiques (ainsi que de certains chercheurs), qui ne trouvent pas de variétés adaptées parmi les variétés commerciales issues de la sélection professionnelle, ou encore pour une agriculture de terroir émergente, ou basée sur des variétés à forte adaptation locale (Bocci et al., 2010). L'hétérogénéité génétique de ces variétés, leur adaptation dynamique au terroir, et le fait de ne pas avoir été sélectionnées compte tenu du recours aux intrants, figurent ainsi, pour ce type d'agriculture, parmi les avantages des variétés traditionnelles ou paysannes sur les variétés modernes (Serpoly et al., 2011).

Dans les pays du sud également, outre leurs avantages culturels et économiques, les variétés traditionnelles constituent un atout face à des conditions de production aléatoires et variables ou de stress, conditions dans lesquelles elles présentent de meilleurs résultats que les variétés commerciales, ou encore pour permettre l'adaptation au changement climatique (Ceccarelli, 1996 ; PAR, 2011 ; CGRFA, 2011).

Les avantages de ce type de semences sont évidemment pertinents alors que l'agriculture doit réduire sa dépendance aux intrants et eu égard à la nécessité de trouver variétés adaptées et adaptables à de nouvelles conditions climatiques (PAR, 2011).

II. L'éviction des variétés traditionnelles et la conservation à la ferme : un phénomène systémique

Un des difficultés cependant rencontrées pour le déploiement des variétés traditionnelles ou paysannes réside dans l'interdiction faite par la législation européenne de mettre en circulation les semences de ces plantes d'un autre genre. C'est en raison principalement de

⁴ Ces termes désignent généralement un groupe de plantes qui a fait l'objet d'une sélection par les agriculteurs et par l'environnement. Elles ne sont pas uniformes comme le sont les « variétés modernes » car elles n'ont pas fait l'objet d'une sélection grâce aux outils sophistiqués de génétique de la recherche variétale scientifique et professionnelle. Elles sont généralement caractérisées par une hétérogénéité génétique et une adaptation au terroir au sein duquel elles évoluent, et présentent également une dimension culturelle en étant généralement associée à une communauté. Elles constituent une des ressources de base de la sélection scientifique (M. HALEWOOD et al., 2006). Nous nous limitons ici à une définition fonctionnelle de ces termes, selon les besoins de la présente contribution.

leur hétérogénéité et de leur évolutivité que la législation sur les semences en interdit la vente aux agriculteurs (ou encore le don entre agriculteurs).

Avant d'étudier le rôle joué par la législation dans la standardisation de l'agriculture, une remarque s'impose quant à la nature systémique de ce phénomène de standardisation. La tendance à l'uniformisation et à la réduction de la diversité génétique qui caractérisent notre agriculture et la sélection moderne, sont en effet dues à un ensemble de facteurs interdépendants et dont la législation constitue un des aspects. Nous avons en effet déjà évoqué que l'homogénéisation des cultures est un instrument de productivité, ce qui manifeste l'importante dimension économique de la standardisation de notre agriculture. La pression exercée en faveur de la tendance à l'uniformisation en agriculture procède cependant aussi plus largement de notre système alimentaire. Ainsi, en est-il des exigences de la transformation industrielle des aliments et de leur distribution en faveur de denrées standards (que deviendront ces semences standards) et d'un nombre limité de variétés (Pimbert, 2011), ainsi que des préférences des consommateurs (portés ou non en cela par le secteur de la distribution). Plus en amont, le transport des denrées alimentaires influence lui aussi les critères de sélection en exigeant des denrées calibrées et résistantes pour le transport.

Il ne faut donc pas perdre de vue que la standardisation de nos produits agricoles est plus généralement le fait d'un modèle agricole et alimentaire soumis à des contraintes de rentabilité, globalisé, en circuits longs, et dont le critère du prix pour le consommateur est déterminant (PAR, 2011). L'uniformité et la standardisation à l'œuvre dans l'agriculture sont donc systémiques et le rôle des législations sur les semences doit être appréhendé comme constituant un aspect d'une logique globale plus large, et non comme la cause primordiale de la réduction de diversité agricole.

II.a. L'impact de la législation dite « catalogue » sur les variétés végétales

La pression en faveur de l'uniformité, de la fixité et de la prévisibilité des plantes d'une variété, est matérialisée et répercutée par la législation relative aux semences. Nous évoquerons ici la législation européenne relative au catalogue des variétés agricoles et variétés de légumes⁵, ainsi que le droit de la propriété industrielle sur les variétés végétales, tel que défini par l'Union pour la protection des obtentions végétales (« UPOV ») et mis en œuvre dans et par l'Union européenne⁶.

La législation relative au catalogue européen des variétés végétales pour l'agriculture se définit comme un système d'autorisation à la mise sur le marché des semences⁷. En vertu de cette législation communautaire qui s'impose aux Etats membres, les variétés végétales doivent être inscrites dans un catalogue officiel afin de pouvoir être mises sur le marché (cela vise la vente de semences mais également le don, l'échange entre agriculteurs). Afin de pouvoir être ainsi inscrites au catalogue, une variété doit être nettement distincte des variétés déjà connues dans l'Union européenne, elle doit être homogène et stable (il s'agit des conditions

5 La réglementation sur les catalogues des variétés végétales et sur la commercialisation de semences repose sur douze directives parmi lesquelles nous citerons :

- la directive 66/402 du 14 juin 1966 concernant la commercialisation des semences de céréales (Journal officiel L 125, du 11.7.1966, p. 2309–2319),
- la directive 2002/53 du 13 juin 2002 concernant le catalogue commun des variétés des espèces de plantes agricoles (Journal officiel L 193, du 20 juillet 2002, p. 1–11),
- la directive 2002/55/CE du Conseil du 13 juin 2002 concernant la commercialisation des semences de légumes (JO L 193 du 20 juillet 2002, p. 33–59).

6 Règlement (CE) n° 2100/94 du Conseil, du 27 juillet 1994, instituant un régime de protection communautaire des obtentions végétales, ainsi que les législations des Etats membres relatives à la protection des obtentions végétales.

7 La législation communautaire relative aux catalogues des variétés végétales fait actuellement l'objet d'une révision par l'Union européenne, révision qui sera évoquée plus loin dans cette contribution.

dites de distinction, homogénéité et stabilité ou « DHS »). Ne peuvent donc être mises sur le marché que les variétés dont les plantes sont identiques les unes aux autres, y compris si elles sont cultivées en des lieux différents, ou sont issues de semences de générations différentes. Cette exigence d'homogénéité limite la richesse génétique des variétés mises à disposition des agriculteurs. Elles ne pourront davantage évoluer (via une adaptation naturelle par exemple), devant toujours rester fidèles à elles-mêmes. Par ailleurs, les variétés dites « agricoles » telles que les céréales, ne pourront généralement être mises en circulation que s'il est en outre établi que leur rendement est supérieur aux variétés déjà présentes sur le marché (c'est la condition dite de « valeur culturelle et d'usage » ou « VCU⁸ ») Le rendement est testé dans les conditions de culture de l'agriculture intensive, souvent avec intrants, et on prend en considération la moyenne sur différents sites, ce qui favorise la mise au point de variétés dont le rendement n'est pas lié à des conditions locales (Louwaars, 1997).

En conséquence de ces conditions, les agriculteurs ne trouveront donc sur le marché que des variétés présentant ce type de caractéristiques. Seront généralement exclues du marché les variétés hétérogènes (ce qui est le cas de la majorité des variétés traditionnelles et paysannes), celles qui sont spécifiquement conçues pour l'agriculture biologique ou adaptées à un terroir bien précis, ou encore celles qui ont été conçues pour leurs capacités particulières d'interaction avec d'autres plantes ou éléments de l'environnement (Louwaars, 1997 ; Lammerts van Bueren, 2007). Malgré son caractère radicalement restrictif, la législation « catalogue » a été récemment jugée conforme principes juridiques fondamentaux de l'Union européenne, tels que les principes de libre circulation des marchandises et de proportionnalité, par la Cour de justice de l'Union européenne, dans le cadre de l'affaire dite Kokopelli. Compte tenu du large pouvoir d'appréciation dont le législateur européen jouit dans le cadre de la politique agricole commune, la Cour a jugé l'objectif de productivité poursuivi par la réglementation « catalogue » justifiait les restrictions qui en découlent, telles que l'interdiction de commercialisation de semences de variétés non stables ou homogènes, telles que les variétés de légumes anciennes⁹.

Reflet des politiques de modernisation de l'agriculture de la première moitié du 20^{ème} siècle, les législations « catalogue » traduisent l'ambition des gouvernements d'accroître la production agricole selon les logiques de l'agriculture productiviste. La législation catalogue normalise ainsi le système semencier, ce qui a conduit à le confier exclusivement aux mains de la sélection scientifique moderne (qui devient « innovation formelle ») et à ses variétés, aptes à satisfaire ces normes grâce à l'exploitation des lois scientifiques de la génétique, et à exclure ainsi les variétés traditionnelles et paysannes (à présent le travail de domestication/innovation sur les variétés par les agriculteurs est qualifiée d'« informelle ») (Bonneuil et Thomas, 2009). Appréhendée comme un instrument de « modernisation » agricole en faveur de la productivité, la législation catalogue se présente également comme une garantie pour les agriculteurs de ne trouver sur le marché que des semences hautement productives, fixes, homogènes, et dotées des caractéristiques annoncées par le vendeur (voyez par exemple les considérants de la directive 66/402 du Conseil, du 14 juin 1996, concernant la commercialisation des semences de céréales).

8 Bien que la condition VCU prenne également en considération les critères la résistance aux organismes pathogènes, du comportement en rapport avec l'environnement physique et de la qualité (aptitude à satisfaire aux exigences des filières), le critère du rendement est généralement prédominant.

9 C.J.U.E., 12 juillet 2012, Association Kokopelli c. Graines de Baumaux SAS (C-59/11). Cet arrêt a été rendu sur question préjudicielle posée par la Cour d'appel de Nancy dans le cadre d'un litige en concurrence déloyale opposant ces deux parties. Le Cour estime par ailleurs que l'objectif de conservation est quant à lui rencontré par les possibilités de dérogation réservées par la législation, en faveur des « variétés de conservation » ou des variétés « sans valeur intrinsèque » (voir à cet égard la section III.b.)

II.b. L'impact du droit de la propriété intellectuelle sur les variétés végétales

La propriété intellectuelle sur les variétés végétales, inspirée en Europe du modèle de l'Union pour la protection des variétés végétales¹⁰, constitue un outil réglementaire supplémentaire qui contribue à l'orientation exclusive de l'agriculture selon le modèle productiviste, en encourageant spécifiquement le développement de variétés adaptées à cette agriculture (Rangnekar, 2000). En effet, la propriété intellectuelle sur les variétés végétales est généralement admise comme constituant un élément déterminant dans la décision d'investir dans la recherche et l'innovation dans le domaine des plantes agricoles. La mise au point d'une nouvelle variété requiert généralement une dizaine d'années de R&D préalable et l'assurance de pouvoir bénéficier du monopole d'exploitation sur cette variété apparaît en conséquence déterminante dans la décision de mener une telle recherche. La propriété industrielle se présente dès lors comme un outil de politique industrielle destiné à encourager l'innovation grâce à l'octroi de monopole d'exploitation sur les résultats de la recherche (Maskus, 2000). Or à nouveau, figurent parmi les conditions qui président au bénéfice de la propriété intellectuelle sur les variétés végétales, l'uniformité et la stabilité des variétés. La volonté politique est donc d'encourager précisément la recherche sur ce type de variétés, alors que sont exclues de cet incitant les variétés hétérogènes et évolutives, telles que les variétés traditionnelles ou paysannes. Tout comme la législation catalogue, la propriété industrielle sur les variétés reflète et procède du modèle de l'agriculture productiviste, en encourageant exclusivement la mise au point de semences qui se prêtent et complètent ses techniques.

Il apparaît en synthèse que le système institutionnel n'autorise (via la législation catalogue) et n'encourage (via la propriété industrielle sur les variétés végétales) que les variétés végétales homogènes et fixes, instruments adaptés au productivisme agricole. Si ces réglementations reflètent les objectifs de sécurité et d'autosuffisance alimentaires d'après-guerre, objectifs rencontrés avec succès dès les années 60, elles participent aujourd'hui aux défis entre-temps survenus qui s'adressent à notre agriculture : la perte de biodiversité agricole (Visser, 2002), la dépendance aux intrants, et les difficultés d'intégration de stratégies agricoles alternatives.

III. Transition : réhabilitation des variétés traditionnelles et du travail paysan sur les semences et progrès législatifs

III.a. Initiatives de transition sur les semences

Face à l'orientation quasi exclusive de la recherche sur les variétés vers les besoins de l'agriculture conventionnelles, à l'absence de variétés adaptées au catalogue, certains agriculteurs et jardiniers, intéressés par un autre modèle agricole, ont entrepris un travail de conservation ou de sélection de ces variétés anciennes, ou encore de développer eux-mêmes (et parfois en collaboration avec des chercheurs du secteur public, dans le cadre de projets de « sélection participative ») de nouvelles variétés mieux adaptées à leurs besoins. Les quelques exemples qui suivent permettent ainsi d'illustrer à la fois les limites de l'innovation formelle et des variétés commerciales, et l'intérêt des alternatives que ce modèle d'innovation exclut.

– L'association *Allkorn* en Suède travaille à la sélection de variétés traditionnelles de céréales. Depuis 1995, les agriculteurs biologiques collaborent avec un chercheur de l'Université de Alnarp pour conserver et améliorer des variétés traditionnelles dont des semences ont été obtenues auprès d'une banque de semences ou auprès d'agriculteurs qui en poursuivaient la culture. Ces variétés sont préférées aux variétés modernes car elles présentent des caractéristiques que la sélection professionnelle ne développe généralement pas. Ainsi en

est-il de leur hauteur, qui leur donne un avantage sur les adventices et contribue à les mettre à l'abri des pathogènes venus du sol. L'aération des plants qui en résulte est également un atout contre les moisissures. La sélection moderne a en effet eu davantage tendance à écourter les pailles des céréales pour éviter la verse, et faciliter ainsi l'utilisation accrue d'engrais azotés et la mécanisation. Les variétés conservées par Allkorn sont également préférées pour leur meilleure adaptation au climat nordique, leurs qualités nutritives et gustatives et pour certaines, leur contenance en antioxydants. Elles s'avèrent également riches en diversité génétique, et de nouvelles variétés peuvent ainsi être déployées au départ d'individus atypiques présents au sein d'une population. Dans des conditions de production biologique et sur sols peu fertiles, elles présentent des rendements égaux voire supérieurs aux variétés modernes. En raison d'un gluten plus faible que les blés généralement sélectionnés pour un gluten fort pour les besoins de la panification industrielle, elles se destinent à la boulangerie traditionnelle, ce qui constitue néanmoins un atout supplémentaire pour ce marché de niche. Le projet Allkorn illustre ainsi cet avantage qu'il y a à impliquer les agriculteurs dans l'innovation sur les semences, et qui réside dans une maîtrise retrouvée des critères de sélection (source : Chable et Osman, 2009; www.allkorn.se).

– *ProSpecieRara* est un projet suisse de conservation in situ mené depuis 1982, qui a pour ambition la conservation des ressources phyto-génétiques, ainsi que la préservation des connaissances et savoir-faire liés à ces ressources. Le réseau constitué par ce projet comporte environ 2500 personnes et institutions qui maintiennent ou développent des variétés dans des jardins et des champs suisses. 900 variétés de légumes, 1800 variétés de fruits et 700 types de baies sont ainsi conservés par le réseau. Le système a été plus récemment complété par un système de labellisation qui permet aux agriculteurs qui développent et utilisent ces variétés de bénéficier d'un avantage commercial et d'une rémunération plus avantageuse. Le projet comporte également un volet pédagogique destiné à informer les citoyens sur la conservation de la biodiversité locale grâce à des journées « fermes ouvertes ». Ainsi, 25% de la population suisse a eu connaissance du projet et de ses finalités (Source : www.farmersrights.org).

– En France, plusieurs projets de recherche participative associant les chercheurs de l'INRA à des agriculteurs (notamment via le Réseau Semences Paysannes) ont été entrepris dans le but de développer des variétés adaptées à la production biologique au départ de variétés traditionnelles. Avec la sélection participative, on échappe au cloisonnement entre l'innovation « formelle » du monde professionnel de la recherche sur les variétés, d'une part, et l'innovation « informelle » effectuée au champ par les agriculteurs, pour compléter chacun des deux systèmes d'innovation par les avantages de l'autre. Cela permet également une réorientation du travail des chercheurs vers les besoins des agriculteurs (Chable et Berthelot, 2006). Face à l'absence au catalogue officiel de variétés adaptées au mode de production bio, les agriculteurs étaient en effet désireux de disposer de variétés adaptées aux conditions locales de culture. Ces projets sont donc également innovants en ce sens qu'ils remettent l'agriculteur au centre de la gestion des ressources génétiques pour l'agriculture et l'alimentation.

Citons parmi les projets ainsi entrepris, la sélection de variétés de blé dont la culture génère une quantité accrue de biomasse, présente une meilleure efficacité racinaire pour les besoins du bio, ainsi qu'une adaptation aux techniques traditionnelles de boulangerie. Ou *Biocivam 11*, association de producteurs bio de l'Aude, qui mène un projet participatif de conservation de variétés de légumes adaptées aux conditions locales : les ressources retrouvées dans des banques de semences ou in situ sont testées, les ressources intéressantes sont multipliées et peuvent ainsi être mises à disposition des agriculteurs bio. *Bio d'Aquitaine* est un autre projet oeuvrant au développement « à la ferme » de variétés (maïs, tournesol,

soja) adaptées à l'agriculture à bas-intrants, et sélectionnées pour leurs qualités gustatives et nutritionnelles. Dans le cadre de ces projets de sélection, l'adaptation aux conditions locales est en outre conçue de manière continue et dynamique, la sélection ambitionnant de suivre les modifications environnementales. Cette approche contribue à permettre aux agriculteurs de sortir de la dépendance technologique à l'égard du secteur semencier, alors qu'ils sont généralement contraints d'attendre la commercialisation de nouvelles variétés adaptées exemple par à de nouvelles conditions climatiques, résistantes à un pathogène d'apparition récente, plus productive encore, etc.

Le projet *Inter Bio Bretagne* illustre aussi cet avantage de l'innovation paysanne, qui réside dans la maîtrise des choix technologiques liés aux semences par le monde agricole. Ce projet a débuté avec la mise au point de variétés de chou-fleur adaptées au bio. Les variétés de chou-fleur mises au point et commercialisées par le secteur semencier inquiètent en effet particulièrement les agriculteurs bio en raison du recours de plus en plus courant à la technique de la stérilité mâle cytoplasmique, y compris pour les variétés bio. Avec *Inter Bio Bretagne*, les agriculteurs sont directement impliqués dans la sélection ainsi que dans la production des semences, ce qui leur permet ainsi de retrouver la maîtrise des choix technologiques afférents aux semences, maîtrise qu'ils ont perdue dans le contexte de dépendance technologique à la recherche formelle du secteur semencier (Sources : Chable et Berthelot, 2006 ; www.farmersrights.org).

– En France, le Piment d'Espelette, adapté aux conditions du Pays basque (le piment a été importé du continent américain au 16^{ème} siècle), constitue lui aussi un exemple de système semencier conduit et géré par les agriculteurs. Ce sont en effet ceux-ci qui produisent, sélectionnent les variétés, se (entre)fournissent et gèrent ainsi les ressources génétiques du Piment d'Espelette. Le Piment d'Espelette est constitué de différentes variétés, fruits notamment d'une adaptation aux différents environnements de culture, variétés qui sont généralement des variétés-population, caractérisées par une hétérogénéité et une diversité génétique (source : Bocci et al. (2006)).

– En Italie, évoquons la sélection du Céleri blanc Sperlonga, entreprise par un agriculteur. Ce type de céleri, apprécié pour son goût et son odeur spéciale, avait été introduit dans le Lazio italien dans les années 60 par un agriculteur local. Il présentait cependant de désavantage de monter en graines de manière précoce. Afin de corriger ce trait, un agriculteur entrepris de le cultiver aux côtés d'une autre variété de céleri (le Dorato d'Asti) qui ne présentait pas cet aspect. Le croisement qui s'opéra généra ainsi une nouvelle variété locale qui présente les avantages des deux lignées, dont la reproduction est entreprise par les agriculteurs eux-mêmes, et qui est valorisée auprès des consommateurs pour sa sélection locale. Cette variété présente en outre une diversité intéressante puisqu'elle se compose en réalité de 5 populations présentant chacune une importante variabilité génétique. L'attrait nouveau des consommateurs pour les produits terroir fournit ainsi un autre motif de réhabilitation des variétés traditionnelles. Plusieurs exemples de conservation de la diversité agrobiologique entreprise par les agriculteurs ont en effet permis la survie ou le développement de variétés satisfaisant à ce marché de niche et font à ce titre parfois l'objet d'une indication géographique. Ils contribuent en outre au développement local, à la reconversion de l'agriculture dans les pays développés dans le contexte de la question épineuse de sa compétitivité dans une agriculture mondialisée, à la sensibilisation du public à la question de l'impact des modes de consommation sur la diversité, ainsi qu'à la reconnexion des consommateurs à l'agriculture et aux agriculteurs (source : Bocci et al. 2006).

– Enfin, en Belgique, l'association Semailles, à Faulx-Les-Tombes, recherche d'anciennes variétés adaptées à nos contrées dans les banques de semences ou dans des

jardins privés, variétés qui ne sont plus commercialisées et dès lors peu ou pas utilisées (ex. la laitue « Blonde de Leaken »). Elle entreprend ensuite de régénérer ces variétés afin de leur rendre leurs caractéristiques d'époque, avant de les multiplier et de les proposer à la vente. Grâce à ce travail de conservation, Semailles, qui fait partie de l'association « Croqueurs de carottes », préserve ces anciennes variétés du risque de disparition lié à leur tombée en désuétude. Ce travail présente aussi l'avantage de permettre à ces ressources génétiques de demeurer adaptées à nos conditions pédoclimatiques de culture, ce qui est un avantage sur la conservation dans les banques de semences (source : entretien avec C. Andrianne, 27 septembre 2011).

III.b. Tentatives législatives en faveur de la diversité cultivée

Nombre des variétés traditionnelles et paysannes qui sont l'objet de ces projets de conservation ne sont pas autorisées à la vente ou au don aux/entre agriculteurs¹¹ car elles sont souvent trop hétérogènes et non fixées que pour permettre leur inscription au catalogue. Même si la culture de ces variétés n'est pas rendue en conséquence illégale, leur commercialisation et leur circulation l'est en revanche. Ces initiatives ne peuvent dès lors que reposer sur la production des semences pour chaque agriculteur par lui-même, ce qui pèse évidemment sur ces systèmes semenciers informels. En plus de la contrainte d'organisation que cela représente, il est pratiquement incontournable de devoir se fournir auprès d'autres agriculteurs dans certains hypothèses telles que la survenance d'un accident de récolte, un nombre insuffisant de semences propres, le désir de diversification, ou pour se lancer une première fois dans la culture d'une de ces variétés. La circulation de ces ressources est en outre une nécessité pour en préserver la richesse génétique et perpétuer leur processus d'adaptation et de diversification. Il arrive ainsi que, notamment pour les besoins de l'AOP ou de l'Indication géographique, certaines variétés soient inscrites au catalogue pour en permettre la commercialisation, mais cela réduit la richesse de la variété, car de plusieurs populations, on aura dû n'en sélectionner qu'une ou deux qu'il aura fallu rendre homogènes, alors que la diversité et la variabilité de ces variétés constituent précisément un de leurs principaux avantages. En outre l'inscription d'une des variétés au catalogue, en en légalisant la mise sur le marché et l'échange entre agriculteurs, comporte le risque de voir cette variété supplanter et évincer les autres variantes de la population, les exposant ainsi au risque de disparition (Bocci et al., 2006).

Face à ces écueils présentés par la législation, certaines initiatives ont vu le jour pour tenter de favoriser la commercialisation de variétés menacées d'érosion ou, plus largement, pour réhabiliter et encourager la conservation des ressources à la ferme, et compléter ainsi la conservation réalisée « ex situ », dans des banques de semences.

Sur la scène internationale :

– La Convention sur la diversité biologique entrée en vigueur en 1993, a pour objectifs la conservation de la diversité biologique, l'utilisation durable des ressources, ainsi que le partage équitable des bénéfices tirés de leur utilisation. Au titre de la conservation *in situ*, la Convention commande aux Etats signataires de préserver et maintenir les connaissances, innovations et pratiques des communautés autochtones et locales en lien avec la conservation et l'utilisation durables de la diversité biologique et promeut leur application sur une plus grande échelle (article 8 j). Pour réaliser l'objectif de protection des ressources génétiques

¹¹ Elles sont parfois néanmoins habilitées à la mise sur le marché en raison d'un montage juridique de fortune ou de la bienveillance des autorités nationales de contrôle.

et des connaissances traditionnelles, ainsi qu'en réponse à la « biopiraterie », la Convention et son récent protocole de Nagoya, instituent le principe de souveraineté des Etats et des communautés sur les ressources, la nécessité de consentement du pays/communauté pour l'accès aux ressources situées sur son territoire, ainsi que le partage des avantages issus de leur utilisation avec ce pays/communauté (article 15)¹².

– Avec le *Traité International sur les ressources phytogénétiques pour l'agriculture et l'alimentation*, traité conclu en 2001 sous l'égide de la FAO, les Parties contractantes (les Etats signataires ainsi que certaines banques de semences) ont convenu de mettre à disposition des personnes relevant des autres Etats contractants un certain nombre de ressources phyto-génétiques pour l'agriculture et l'alimentation (64 espèces cultivées), via la constitution d'un « Système multilatéral d'accès et de partage des avantages » (Partie IV). Alors que cet aspect concerne plus spécifiquement le secteur formel de la recherche scientifique sur les variétés en facilitant l'accès aux ressources génétiques, le traité renferme également un volet relatif à la conservation et l'innovation sur ces ressources génétiques à la ferme. Les Etats parties sont incités par le traité à favoriser des systèmes agricoles diversifiés, ainsi que la recherche sur les variétés paysannes, sur des variétés « adaptées », sur les pratiques agroécologiques, en ce compris la recherche participative. Ils sont également encouragés à favoriser un élargissement de la base génétique des plantes pour l'agriculture, à promouvoir les plantes locales et adaptées, la conservation à la ferme, ainsi qu'à adapter à cet effet les stratégies de sélection et les réglementations sur la commercialisation des semences (article 6). Révolution dans le paysage institutionnel, le traité met en place la figure des « Droits des agriculteurs », dont l'objet est de reconnaître le travail millénaire de domestication et de conservation des ressources génétiques des plantes, effectué par les agriculteurs, ainsi que de l'encourager pour l'avenir. Les « Droits des agriculteurs » présentent trois composantes : la protection par les Etats des connaissances traditionnelles en lien avec les ressources génétiques des plantes, la participation, sur base multilatérale, des agriculteurs aux avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques, et leur participation aux décisions liées à la conservation et à l'utilisation durable de ces ressources (article 9). Enfin le Traité met en place un fond de partage des avantages issus de la commercialisation des ressources qui relèvent du champ d'application du traité, partage devant en priorité bénéficier aux agriculteurs qui conservent et utilisent durablement les ressources génétiques.

Les assouplissements de la législation européenne sur les variétés végétales :

– Consciente des écueils posés par la réglementation « catalogue » pour la conservation « in situ » de la diversité agricole et eu égard aux besoins de l'agriculture à bas intrants, l'Union européenne a adopté en 2008 et 2009 deux directives destinées à permettre l'inscription de variétés « de conservation » et des « variétés de légumes destinées à des conditions de culture particulières » au catalogue¹³. Ces directives constituent notamment une mise en œuvre du Traité International FAO précité, que l'UE a signé en 2004.

¹² Notons qu'avec ce mécanisme de partage des avantages, on retrouve la même logique d'incitant financier à l'innovation/conservation qui préside à la propriété intellectuelle.

¹³ Le principe d'ouvrir les législations nationales aux variétés de conservation était déjà établi depuis 2002 (directive 2002/53/CE), mais sa mise en œuvre a nécessité une dizaine d'années de négociation.

Les directives 2008/62¹⁴ et 2009/145¹⁵ autorisent les Etats (mais ils n'y sont pas tenus) à assouplir les conditions d'inscription au catalogue pour les variétés dites « de conservation ». Ces variétés sont alors soumises à des exigences de distinction, uniformité et stabilité plus souples et dispensées de satisfaire à la condition de « valeur culturelle et d'utilisation ». Les directives étant soumises à la mise en œuvre qu'en feront les Etats, il est prématuré d'apprécier dans quelle mesure elles permettront de réhabiliter effectivement les variétés traditionnelles ou paysannes et la conservation des ressources « à la ferme ». Le texte fait déjà néanmoins l'objet du scepticisme des milieux de la conservation *in situ* et de certains scientifiques (voir par ex. Veteläinen, 2009, Serpolay et al., 2011 ; Réseau Semences Paysannes). En plus d'être optionnelle pour les Etats, la dérogation est en effet encadrée de conditions assez strictes. Ainsi seules peuvent bénéficier de ce régime assoupli les variétés qui sont « menacées d'érosion génétique », et elles ne pourront être produites et commercialisées qu'en quantités limitées et uniquement dans leur « région d'origine ». Ces conditions ne permettent ainsi par exemple pas l'inscription au catalogue du résultat de certains travaux de recherche participative qui consistent par exemple à tester des variétés locales en différents sites pour les besoins de l'agriculture bio, ou encore l'inscription de nouvelles variétés issues d'une sélection paysanne récente. La condition du « lieu d'origine » est peu heureuse eu égard à l'intérêt que peuvent représenter des variétés issues d'un autre terroir dans un contexte de changement climatique, ou encore eu égard au fait qu'une variété adaptée à la production à bas intrants puisse être prometteuse en d'autres lieux de culture que son « lieu d'origine », en raison de conditions similaires de production à bas intrants (Serpolay et al., 2011). En limitant les différents environnements de culture, cette condition de confinement des variétés à leur lieu d'origine sera en outre susceptible d'en appauvrir la richesse génétique et leur potentiel d'adaptation (Goldringer et al., 2010). D'une manière générale également, ces conditions privent du bénéfice de la dérogation les variétés qui, bien qu'intéressantes pour l'agriculture sans intrants, ne sont pas menacées d'érosion et délaissées par le secteur semencier formel.

Bien qu'un certain flou de la directive laisse une certaine marge de manœuvre aux Etats membres, les conditions « DUS » seraient quant à elles insuffisamment assouplies (la condition d'uniformité par exemple ne tolère que 10% au plus de plantes hors-type), ce qui ne permettrait de réhabiliter beaucoup de variétés-population et de variétés paysannes considérées trop hétérogènes. Enfin, la condition de stabilité ne tient pas compte de l'évolutivité des variétés traditionnelles, et alors même qu'il s'agit là justement d'une des raisons pour lesquelles ces variétés éveillent un regain d'intérêt (Bocci et al. ; 2006, Bocci et al., 2010).

– Un second régime dérogatoire est prévu pour les variétés de légumes « sans valeur intrinsèque pour la production commerciale » et « créées en vue de répondre à des conditions de culture particulières¹⁶ ». Cette dérogation (qui ne s'applique pas aux variétés agricoles) vise les variétés créées pour être cultivées dans des « conditions agro-techniques, climatiques ou pédologiques spécifiques ». Elle n'est pas soumise aux mêmes conditions d'érosion génétique et d'origine que la dérogation visant les variétés de conservation, mais ne vise cependant que le marché amateur en raison de restrictions quantitatives qui en frappent la commercialisation.

14 Directive 2008/62/CE de la Commission du 20 juin 2008 introduisant certaines dérogations pour l'admission des races primitives et variétés agricoles naturellement adaptées aux conditions locales et régionales et menacées d'érosion génétique, et pour la commercialisation de semences et de plants de pommes de terre de ces races primitives et variétés.

15 Directive 2009/145/CE de la Commission du 26 novembre 2009 introduisant certaines dérogations pour l'admission des races primitives et variétés de légumes traditionnellement cultivées dans des localités et régions spécifiques et menacées d'érosion génétique, et des variétés de légumes sans valeur intrinsèque pour la production commerciale mais créées en vue de répondre à des conditions de culture particulières, ainsi que pour la commercialisation de semences de ces races primitives et variétés.

16 Directive 2009/145/CE précédemment citée.

– Enfin, il faut noter que la législation communautaire sur les semences fait actuellement l'objet d'une révision. La conservation de la biodiversité et les exigences de l'agriculture à bas intrants figurent parmi les motifs qui sont à la base de cette révision, aux côtés du coût généré par la législation catalogue pour les Etats membres notamment. Parmi les options envisagées, la solution de dispenser les variétés de conservation des exigences de l'inscription au catalogue est évidemment une piste intéressante. Une option envisagée, plus sévère pour la conservation à la ferme, est l'accrochage complet de la législation semences sur celle de la propriété intellectuelle et sa gestion par ses organes (voir le site web de la commission européenne http://ec.europa.eu/food/plant/plant_propagation_material/review_eu_rules/index_en.htm, en particulier le document « Options & Analysis paper »).

Quelques aménagements de droits nationaux ¹⁷:

– En vertu d'une interprétation large des directives semencières, en ce compris les directives variétés de conservation présentées ci-avant, la Norvège a adopté une législation semencière plus souple pour la conservation paysanne. Ainsi la Norvège, où la tradition de réensemencement est bien ancrée, autorise les agriculteurs à s'échanger, se vendre, se donner des semences, dès lors que cela est réalisé à titre non commercial. Une propriété intellectuelle moins stricte pour le réensemencement a également été adoptée, couvrant uniquement l'exploitation commerciale de la variété (source : www.farmersrights.org)

– L'Italie et ses Régions ont adopté des réglementations ambitieuses visant au maintien à la ferme de la diversité biologique agricole. Mettant en oeuvre le « Traité International » de la FAO, la Régions ont institué, avant l'adoption des directives dérogatoires, divers mécanismes institutionnels destinés à la conservation des ressources génétiques autochtones, ainsi que non autochtones dès lors qu'elles sont cultivées localement depuis plusieurs décennies. Les possibilités d'inscrire les variétés de conservation au catalogue, instituées par un décret national d'harmonisation (décret 46/1007), sont plus larges que les directives européennes. Ainsi la condition relative à la menace d'érosion et de lien avec une zone d'origine ne sont pas applicables en toutes hypothèses. Un régime d'identification des variétés y remplace celui des prescriptions quelque peu assouplies de distinction, homogénéité, et stabilité. L'inscription est en outre gratuite. Par ailleurs les législations régionales prévoient également des mécanismes plus proactifs d'incitation à la conservation des ressources à la ferme. Ainsi, à l'instar d'un système de labellisation, certaines d'entre elles prévoient l'apposition volontaire d'une indication distinguant les variétés de conservation sur le marché ainsi que leurs produits dérivés. Un remboursement des agriculteurs pour les frais exposés pour le travail de conservation effectué est également prévu par les législations régionales. Enfin, les Régions ont la responsabilité d'identifier et d'inventorier les ressources génétiques concernées (ce qui constitue évidemment un préalable important pour en apprécier ensuite l'érosion).

Un réseau est également constitué par la législation, qui met en relation les divers acteurs impliqués dans la diversité biologique agricole (banques de semences, associations, institutions de recherche, universités et agriculteurs). Ce réseau créé ainsi un pont entre conservation *ex situ* (banques de semences) et conservation à la *ferme*, en amenant les acteurs de ces deux domaines à travailler ensemble. Cette formalisation de l'implication des agriculteurs dans le secteur de la conservation confirme ces derniers dans leur rôle traditionnel de "gardiens de la biodiversité". Le réseau constitue également un espace de libre circulation des ressources semencières et des connaissances qui y sont associées, où l'échange de semences est autorisé. Cela réhabilite la tradition d'échange de semences entre les agriculteurs, tradition qui

¹⁷ Afin de présenter des approches diverses, nous n'exposerons dans cette partie que des législations qui présentent des alternatives aux directives dérogatoires européennes.

a constitué la substance du travail d'innovation paysanne sur les semences depuis les débuts de l'agriculture. A cet égard, le décret national d'harmonisation confirme explicitement le droit des agriculteurs de vendre les semences des variétés de conservation. Fruit d'un compromis, le décret prévoit cependant également d'étroites restrictions quantitatives pour la circulation des semences (don, échange) entre agriculteurs (Sources : Bertacchini, 2009 ; Bocci, 2009).

– La Suisse autorise, moyennant décision des autorités administratives, la mise en circulation de semences de « variétés de niche » (« variété du pays », « ancienne variété », « écotype », ou « toute autre variété qui ne doit pas répondre aux exigences relatives à l'enregistrement dans le catalogue des variétés ¹⁸ »). Ces variétés ne doivent pas satisfaire aux conditions de distinction, homogénéité et stabilité. Il est en revanche prévu qu'il soit fait mention de l'absence de certification sur les paquets de semences de ces variétés. Ainsi, la Suisse a préféré l'information à la normalisation, comme instrument de protection de l'agriculteur-client du secteur semencier.

– Beaucoup plus loin de nous, la loi indienne de protection des variétés végétales et des « Droits des agriculteurs » mérite d'être relevée car elle est pionnière dans la reconnaissance des droits des agriculteurs.

En 2001, la loi indienne de propriété intellectuelle des variétés végétales est une des premières législations nationales à aborder la protection des variétés végétales de manière inclusive avec la protection des « droits des agriculteurs ». En 1995, l'Accord sur les aspects de propriété intellectuelle liés au commerce et aux services (ADPIC) de l'Organisation mondiale du commerce, fait obligation aux Etats-parties à l'OMC de protéger les variétés végétales. Le modèle de la propriété intellectuelle s'étend alors obligatoirement aux pays du sud. En 2001 le Traité international FAO invite quant à lui les Etats signataires à protéger les « droits des agriculteurs ». Précédant ces mouvements, l'Inde entreprend dès la fin des années 80 de concevoir une législation de protection des droits des uns et des autres, dans un objectif de réalisation de l'intérêt général. En particulier, c'est le travail de conservation et d'innovation paysanne que cette législation consacre en prévoyant divers dispositifs destinés à préserver et à encourager ces activités. Ainsi la loi indienne tente de conférer aux agriculteurs les mêmes moyens de protéger leurs variétés par la propriété intellectuelle que les sélectionneurs. A cette fin, elle permet la protection des variétés « existantes ¹⁹ », des variétés paysannes, des variétés traditionnellement cultivées et ayant évolué dans les champs, ainsi que des plantes sauvages à l'égard desquelles les agriculteurs possèdent des connaissances traditionnelles. En plus d'assurer l'exclusivité de l'exploitation des variétés paysannes par les agriculteurs impliqués dans leur sélection et d'encourager ainsi leur action de conservation et d'innovation sur les plantes, la reconnaissance d'un titre de propriété intellectuelle sur ces variétés paysannes facilite leur protection contre la « biopiraterie ». La législation donne également la possibilité d'instituer une communauté paysanne en qualité de titulaire du droit sur une telle variété. L'enregistrement et les tests sur les variétés sont sans frais pour les variétés paysannes. Notons cependant que les exigences de distinction, d'homogénéité et de stabilité demeurent, exigences généralement pointées comme constituant l'obstacle empêchant l'inscription des variétés paysannes au catalogue ou leur protection par la propriété intellectuelle. Le symbole est néanmoins incontestablement de taille.

Beaucoup plus concret est le droit consacré des agriculteurs de sauvegarder les semences issues de leurs récoltes, de les ressemer, de les donner, ainsi que de les vendre. A cet égard, la législation indienne entend préserver la tradition millénaire d'échange semencier,

18 Ordonnance du 7 décembre 1998 sur les semences et les plants des espèces de grandes cultures, de cultures fourragères et de cultures maraîchères, article 29.

19 « Extant varieties ».

essentielle à la conservation et l'innovation paysannes sur les ressources génétiques. Sont interdites cependant la distribution et la vente de ces semences de ferme sous la dénomination officielle de la variété, dénomination dont l'usage est exclusivement réservé à l'obteneur. La législation veut également concrétiser l'encouragement des agriculteurs à s'engager dans la conservation des ressources en mettant sur pied un mécanisme destiné à assurer un retour financier aux agriculteurs en cas d'exploitation de leur travail de conservation. Conformément au principe de partage des avantages édicté par la Convention sur la diversité biologique, un fond est constitué, destiné à recevoir les contributions des obtenteurs de variétés végétales lorsqu'ils commercialisent une variété qui a été mise au point en recourant notamment à des ressources génétiques à la conservation desquelles les communautés agricoles ont participé. Les contributions sont ensuite retournées à ces derniers en vue de compenser et d'encourager leurs activités de conservation/sélection. Relevons également cet autre aspect des Droits des agriculteurs indiens, qu'est l'obligation explicite faite aux sélectionneurs d'informer sur les performances réelles des leurs produits variétaux ainsi que la consécration explicite du droit pour ces derniers à obtenir réparation lorsque leurs récoltes s'écartent des affirmations du sélectionneur. Remarquons qu'il s'agit là d'une alternative au système du catalogue pour garantir aux agriculteurs des variétés productives (sources : Chaturvedi et Agrawal, 2011 ; www.farmersrights.org).

Conclusion

Les rapports précédemment évoqués ont rappelé le caractère multifonctionnel de l'agriculture (IAASTD, 2008 ; De Schutter, 2010 ; PAR, 2011). L'agriculture constitue bien plus qu'un outil pour la production alimentaire (et non alimentaire), présentant en effet des fonctions diverses telles la production de services écologiques, la protection de l'environnement et la conservation de la diversité biologique, la fourniture de moyens de subsistance, le maintien de la cohésion sociale, la préservation des cultures, des traditions et identités (voy. par ex. IAASTD, 2008). On retrouve ici également l'approche de l'agroécologie (Buttel, 2003).

Orientés vers la production, la législation catalogue et le droit de la propriété industrielle faillissent à contribuer à la synthèse de ces différentes fonctions de l'agriculture²⁰.

Les initiatives institutionnelles inspirées par le constat d'érosion de la diversité cultivée, en particulier les directives communautaires « variétés de conservation », bien que traduisant une prise de conscience de l'impact de la généralisation des variétés à haut-rendement de la sélection professionnelle sur la biodiversité cultivée, ne réintègrent la dimension de la conservation qu'à la marge de l'agriculture. La fonction conservatrice de l'agriculture n'y est en effet réintroduite que de manière exceptionnelle, pour les variétés menacées d'érosion et pour certaines variétés de légumes particulières et destinées au marché amateur. Ces directives n'ont donc pas pour objet de réhabiliter l'approche multifonctionnelle de l'agriculture, où conservation et développement de la diversité (« innovation ») seraient appréhendés comme des fonctions à part entière de l'agriculture, aux côtés de la production alimentaire. L'agriculture et l'innovation variétales demeurent donc essentiellement affaires de production, et la conservation et l'innovation des ressources phyto-génétiques demeurent reléguées *ex situ*, loin des champs, dans les banques de semences, les laboratoires de la recherche scientifique et le secteur semencier. Quant aux agriculteurs, ils demeurent, aux yeux de la

20 Cela vaut, en dépit de certaines dispositions règlementaires qui sont le reflet partiel de la prise en compte d'autres aspects liés à l'agriculture, telle que l'exception dite du « privilège de l'agriculteur » aux droits exclusifs de propriété intellectuelle sur les variétés. Il s'agit de l'autorisation, entourée de limites strictes cependant, donnée par la loi à l'agriculteur, de réutiliser les semences issues de sa récolte. Cette concession aux droits exclusifs de l'obteneur de la variété procède notamment de la reconnaissance de la tradition paysanne millénaire de réensemencement.

législation (catalogue et propriété intellectuelle), des « producteurs », acheteurs de semences et d'innovations végétales qui demeurent l'affaire et la propriété intellectuelle du secteur semencier, et à ce titre simples bénéficiaires d'une « licence d'utilisation » sur ces semences (Bonneuil et Thomas, 2009).

Relevons également l'importance du phénomène de privatisation de l'innovation, comme aspect déterminant son visage, les caractéristiques des variétés qu'elle développe, ses répercussions sur le système agricole et le régime de propriété des semences. Ainsi, l'investissement de la recherche variétale par le secteur privé dès les années 80 suite à la contraction des fonds publics affectés à la recherche variétale, les contraintes de rentabilité qui s'en suivirent, l'orientation de la recherche vers les espèces à potentiel lucratif et la recherche d'économies d'échelle, ne sont-ils pas déterminant dans la diminution de la biodiversité cultivée aujourd'hui constatée ?

C'est à l'époque de cette privatisation de la recherche que l'on assiste également à un déploiement sans précédent de la propriété intellectuelle dans ce domaine (bien qu'elle existât déjà auparavant), comme facteur de la rentabilité devenue nécessaire de l'innovation privée (Groupe Crucible II, 2001). L'investissement de la recherche sur les plantes agricoles par le secteur privé induit inévitablement une faille démocratique dans la gestion des ressources végétales alimentaires. Les agriculteurs et citoyens se trouvent en effet exclus des choix et orientations d'innovation décidées par le secteur privé de la recherche, alors que des questions de devenir alimentaire sont en jeu. La marge d'action publique est en grande partie reléguée aux activités de conservation déployées en dehors de la sphère agricole. A nouveau, on distingue ici la marque d'une conception dissociée de l'agriculture et de l'innovation variétale, qui sépare innovation pour la production, et conservation ; choix privés pour l'un, choix publics pour l'autre.

Une réelle réconciliation de l'agriculture et de l'innovation variétales avec la diversité cultivée et ses autres fonctions sociales et environnementales nécessiterait une réflexion plus globale couvrant les différents aspects systémiques qui façonnent l'agriculture et l'innovation. Les questions du financement de la recherche et des contraintes économiques qui s'imposent à notre agriculture et conditionnent notre modèle alimentaire, devraient ainsi être intégrées aux réflexions et politiques portant sur la biodiversité agricole.

Bibliographie

- Altieri, M. A., (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19-31.
- Altieri, M. A., et Merrick, L.C., (1987). In Situ Conservation Crop Genetic Resources through Maintenance of Traditional Farming Systems. *The new Botanical Garden Press* 41 (1): 86-96.
- Bertacchini, E., (2009). Regional legislation in Italy for protection of local varieties. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 103 (1/2) : 51-63.
- Buttel, F.H., (2003). *Envisioning the Future Development of Farming in the USA: Agroecology between extinction and multifunctionality?*, University of Wisconsin, Wisconsin.
- Bocci, R., et al., (2006). Analysis of relevant cases studies on the Role of Innovative Market Promoting Sustainable Use of Agrobiodiversity, *Farm Seed Opportunities*, deliverable 4.4.
- Bocci, R., (2009). Seed legislation and agrobiodiversity : conservation varieties. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 103 (1/2): 31-49
- Bocci, R., et al., (2010). Policy recommendations, *Farm Seed Opportunities*, deliverable 4.6.
- Bonneuil, Ch., Thomas, F., (2009). *Gènes, pouvoirs et profits*, Quae, Versailles.
- Brush, S. B., (1994). Providing Farmers 'Rights through in situ conservation of crop genetic resources, *Commission on Plant Genetic resources*, FAO, Rome.
- Ceccarelli, S., (1996). Positive interpretation of genotype by environment interactions in relation to sustainability and biodiversity, *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas*, Aleppo (Syria).
- Chable, V., et Berthelot, J-F., (2006) : La sélection participative en France : présentation des expériences en cours pour les agricultures biologiques et paysannes. *Dossier de l'environnement de l'INRA* 30 : 129-138.
- Chaturvedi, S. et Agrawal, C., (2011). Analysis of Farmers' Rights in the light of protection of plant varieties and Farmers' Rights Act of India. *European Intellectual Property Review* 11, 708-714.
- Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture-CGRFA, (2011). *Options to promote food security: on-farm management and in-situ conservation of plant genetic resources for food and agriculture*, FAO, Rome.
- De Schutter, O., (2010). *Agroecology and the Right to Food*, report presented at the 16th Session of the United Nations Human Rights Council [A/HRC/16/49].
- Desclaux, D., (2005). Participatory plant breeding methods for organic cereals, in: Lammerts van Bueren E.T., Ostergard H. (Eds.), *Proceedings of the COST SUSVAR/ECO-PB workshop on organic plant breeding strategies and the use of molecular markers*, p.17-23.
- FAO (1996). *State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*, Rome.
- FAO (2010), *Second State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*, Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture, Rome.
- Fowler, C., et Mooney, P., (1990). *Shattering: Food, Politics, and the Loss of Genetic Diversity*, University of Arizona Press, Arizona.

- Goffaux, R., et al., (2011). Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre cultivé en France depuis un siècle, rapport FRB, Série Expertise et Synthèse.
- Goldringer, I., et al., (2010). Report on the analysis of the bottlenecks and challenges identifies for on-farm maintenance and breeding in European agricultural conditions, Farm Seed Opportunities, deliverable D2.3.
- Groupe Crucible II (2001). Le débat sur les semences (vol. 1). Solutions politiques pour les ressources génétiques, Centre de recherches pour le développement international (Canada), Dag Hammarskjöld Foundation et Institut international des ressources phytogénétiques.
- Halewood, M., et al., (2006). Farmers, landraces and property rights, in: Cottier, T., Berglas, D.S. (Eds), Rights to Plant Genetic resources and Traditional Knowledge, CABI, Cambridge, pp. 173-197.
- International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development- IAASTD, (2008). Agriculture at a Crossroads, Island Press, Washington D.C.
- Lammerts van Bueren, E.T., (2007). European perspectives of organic plant breeding and seed production in a genomics era. JARTS, Supplement 89, 101-120.
- Lammerts van Bueren, E.T., et al. (2010). The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 19, 1-13.
- Louwaars N.P., (1997). Regulatory aspects of breeding for field resistance in crops. Biotechnology and Development Monitor 33, 68.
- Maskus, K.E., (2000). Intellectual property rights in the global economy, Institute for International Economics, Washington D.C.
- Mazoyer, M., et Roudart, L., (2002). Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine, Seuil, Paris.
- Millenium Ecosystems Assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being, Island Press, Washington DC.
- Osman, A., et Chable, V., (2009). Inventory of initiatives on seeds of landraces in Europe. Journal of Agriculture and Environment for International Development 103 (1/2): 95-130.
- Pimbert, M., (2011). Participatory research and on-farm management of agricultural biodiversity in Europe, International Institute for Environment and Development, London.
- Platform for Agrobiodiversity Research -PAR (2011). Biodiversity for Food and Agriculture, Contributing to food security and sustainability in a changing world, FAO, Rome.
- Rangnekar, D., (2000). Plant Breeding, Biodiversity Loss and Intellectual Property Rights, School of Economics, Kingston University, UK.
- Réseau Semences Paysannes. Règlementation sur la commercialisation des semences et plants, http://www.semencespaysannes.org/reglementation_commercia_semences_plants_434.php.
- Serpolay, E. et al., (2011). Diversity of different farmer and modern wheat varieties cultivated in contrasting organic farming conditions in Western Europe and implications for European seed and variety legislation. Organic Agriculture 1: 127-145.
- Swanson, T.M., Pearce, D.W., Cervigni, R., (1994). The appropriation of the benefits of plant

genetic resources for agriculture: an economic analysis of the alternative mechanisms for biodiversity conservation, FAO, Rome.

Thrupp, L. A., (1998). Cultivating diversity. Agrobiodiversity and food security, World Resources Institute, Washington DC.

UNEP (1995). Global Biodiversity Assessment, Cambridge University Press, USA.

Vanloqueren G., et Baret, P., (2009). How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Research Policy* 38 : 971-983.

Veteläinen, M., et al., (2009). European landraces : on-farm conservation, management and use, Bioversity International, Rome.

Visser, B., (2002). An agrobiodiversity perspective on seed policies, in: Louwaars N. (Ed.), *Seed policy, legislation and law : widening a narrow focus*. The Haworth Press, New-York, p.231-245.

La distribution des richesses naturelles et écologiques

Bruno KESTEMONT

Bruno.kestemont@economie.fgov.be
Statistics Belgium, 30 Bd Simon Bolivar, 1000 Bruxelles
ULB-SBS(CEESE) et IGEAT (CEDD)
Ingénieur agronome, docteur en science

Introduction

En condition de ressources limitées et de libre marché, les plus pauvres risquent de ne plus avoir accès au minimum vital. Il y va d'un accès minimum à la terre, l'alimentation, l'air pur, l'eau claire, l'élimination des déchets, l'empreinte écologique, les émissions de CO₂, les engrais, les pesticides, la dégradation de la biodiversité consentie pour le développement etc. On assiste effectivement, depuis les années 80, à une augmentation de la malnutrition dans le monde : 1,02 milliards de personnes aujourd'hui¹. Quels outils mettre en œuvre pour à la fois réduire l'impact global de l'économie sur les ressources et prévenir l'apparition de pauvreté environnementale relative ou absolue ?

Les « outils économiques » (taxes, subsides, échanges de droits d'émission) avancés par les pays riches pour limiter le déficit écologique planétaire partent du principe de l'internalisation des coûts sociaux et environnementaux pour corriger les biais du marché. Ils font l'objet, pour leur principe, d'un relatif consensus auprès des organisations internationales et d'une majorité d'experts (Barde 1999). Les arguments pour de tels outils s'appuient essentiellement sur la théorie néoclassique et son concept d'*homo oeconomicus*. Suivant ce concept, des acteurs économiques parfaitement rationnels et égoïstes cherchent à maximiser un rapport qualité/prix parfaitement connu (Arrow et Debreu 1954; Kestemont 2011). Une taxe environnementale les mène alors automatiquement à réduire leur consommation au profit de substituts de qualité équivalente mais moins polluants et donc moins chers (si la taxe représente le coût social de la pollution). Un subside a l'effet inverse (favoriser des technologies plus propres). Taxes et subsides infléchissent le comportement des acteurs économiques individuels mais sans garantir l'évolution vers un seuil ou une norme globale soutenable. Une croissance du pouvoir d'achat moyen continue en effet à augmenter la pression sur les ressources globales, et ce potentiellement sans limite. Les échanges de droits d'émission ont pour effet théorique de minimiser le coût global de dépollution jusqu'à une limite fixée par une norme. Le montant de la réduction de coût est une fonction en U inversé de la sévérité de la norme globale (Hecq et Kestemont 1991). Nous testons les conditions dans lesquelles les échanges de droits auraient pour principal effet combiné :

-une redistribution de la consommation intermédiaire des ressources des systèmes de production les moins performants vers les plus performants (les usines les plus propres acquièrent *in fine* plus de droits d'émission) ;

-une redistribution des consommations finales des personnes les plus pauvres vers les personnes les plus riches en terme de pouvoir d'achat.

Ce dernier effet (injustice sociale) se retrouve également, dans les mêmes conditions, pour les taxes alors que les subsides auraient l'effet distributif inverse (ils favorisent les plus pauvres, toutes choses étant égales par ailleurs). Nous allons voir sous quelles conditions

¹ <http://www.fao.org/wsfs/world-summit/en/> [29/8/2009]

cette hypothèse d'injustice sociale des outils économiques est vérifiée.

Hypothèses et déductions théoriques

Les taxes environnementales ont l'inconvénient théorique de la taxation (ce qui introduit un biais dans le jeu du marché parfait) (Kestemont 2012) sauf à remplacer l'impôt sur le revenu (Chiroleu-Assouline et Fodha 2012).

La théorie néoclassique a été critiquée par de nombreux auteurs (Alternatives Economiques 2007; Kestemont 2011). En particulier, la figure de l'*homo oeconomicus* semble très éloigné de la réalité. L'homme n'est ni parfaitement rationnel (Kahneman et Tversky 1979; Kahneman 2003), ni parfaitement égoïste (Mauss 1924; Kestemont 2008).

A l'opposé de la théorie néoclassique, nous posons le cadre de référence suivant, inspiré entre autres des courants de l'économie écologique (Gowdy et Erickson 2005) pour l'aspect physique et l'économie institutionnaliste (Postel 2007) pour le comportement des acteurs:

- La biosphère, en tant que base de notre alimentation, n'a pas de substitut. Nous n'avons qu'une planète (Daly 1973; Wackernagel et Rees 1996).

- Des ressources minérales essentielles et utilisées en quantités énormes par l'industrie sont en voie de raréfaction (Kesler 1994).

- Leur extraction ou leur recyclage se fait à rendement énergétique décroissant (Georgescu-Roegen 1975; Georgescu-Roegen 1979).

- La quantité de «déchets» produits par l'activité économique est aujourd'hui telle qu'elle met en péril la capacité de la biosphère à se régénérer [Vitousek et al., 1997, Rockström et al., 2009].

- Les normes sociales jouent un rôle décisif dans les problèmes d'action collective et de participation au bien commun [Elster, 1989, Ostrom, 1998].

- Les outils économiques présentent des incohérences théoriques, des problèmes éthiques, des problèmes de mesure et ne sont pas efficaces sur ceux qui polluent le plus (Kestemont 2012).

- Les outils économiques sont neutres en matière de préservation de l'environnement global; ils influencent les coûts et leur répartition.

Cette dernière hypothèse part d'un raisonnement valable uniquement en l'absence de substituabilité de l'environnement par un autre facteur (par exemple : capital manufacturé): ce n'est pas l'outil économique qui limite en soi l'impact environnemental, mais bien soit la norme, soit la limite physique. En effet, en cas de croissance illimitée du revenu et du pouvoir d'achat, la demande d'utilisation des ressources est illimitée quelle que soit la base de taxation. La consommation de carburant est, par exemple, peu sensible à la variation des prix dans les pays développés (Brons, Nijkamp et al. 2008). Il n'y a en effet actuellement pas d'alternative économiquement accessible aux carburants fossiles. Sans l'introduction de normes, il n'y aurait pas eu d'amélioration sensible de l'efficacité énergétique des véhicules en Europe, et une augmentation supplémentaire de 50% des taxes serait nécessaires pour atteindre des objectifs plus élevés sans nouvelle norme (Clerides et Zachariadis 2008). A ces taux, la taxe se rapproche plus d'une amende dissuasive (donc d'une norme) que d'un outil économique (paiement proportionnel au coût social).

Il a d'autre part été démontré que seule une ressource naturelle à la fois renouvelable et substituable peut être utilisée de manière durable (voir Hotelling 1931; Hartwick 1977; Comolli

2006; Martinet et Rotillon 2007). Seule une consommation nulle permet en effet de préserver une *ressource non renouvelable et non substituable*. Dans le cas d'un capital naturel *non renouvelable, mais substituable* (pétrole, gaz, charbon, cuivre, zinc, or et autres métaux), le niveau d'utilité ne peut être soutenu que si l'investissement net de l'économie est nul (Hartwick 1977), autrement dit si l'investissement en capital manufacturé remplace exactement sa propre dépréciation et la dépréciation du capital naturel. Une surconsommation passagère de ce genre de ressource a des répercussions nettement plus dramatiques pour la soutenabilité que la sous-consommation (« sacrifice ») ne lui est bénéfique (Martinet et Rotillon 2007). A terme, ce genre de ressource a toute chance de disparaître, le tout étant de trouver un chemin optimal d'utilisation de la ressource et de ses substituts qui ne soit jamais en surproduction sans non plus être trop conservateur. Une ressource *renouvelable non substituable* est soit sous-utilisée soit vouée à disparaître (Comolli, 2006). Restent les ressources *renouvelables et substituables* (comme la lumière solaire). Ces dernières ne nous intéressent pas ici.

Cet article ne traite que du cas des ressources renouvelables sans substitut (par exemple la biosphère), et des ressources non renouvelables pour lesquelles le taux de substitution n'est pas suffisant (par exemple les énergies fossiles et leurs émissions de CO₂). C'est-à-dire les ressources *limitées* à notre échelle de temps (soit que les limites sont dépassées, soit que l'on s'approche de ces limites à au moins un point de l'espace ou du temps).

Données empiriques

Les inégalités de revenu croissent avec la libéralisation de l'économie mondiale depuis les années 80 (Atkinson, Piketty et al. 2009; Husson 2011; Englert 2012).

Les pressions sur certaines ressources naturelles et écologiques irremplaçables ont atteint leurs limites (Rockström 2009; Kestemont 2010; WWF 2010).

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre continuent à augmenter depuis les accord de Kyoto (data.worldbank.org). Il en va de même pour les émissions de SO₂ (Lefohn, Husar et Husar, 1999) et potentiellement toute problématique ne faisant pas l'objet de norme globale, donc ouverte aux décisions économiques. En cas de contraintes normatives unilatérales d'un Etat, la compétitivité de ses entreprises risque d'être affectée. On assiste alors à une délocalisation de la production et des impacts de la consommation intérieure vers des Etats moins contraignants (Peters, Minx et al. 2011).

Les taxes et accises sont très élevées en Belgique sur les carburants (50 % pour le diesel et 60 % pour l'essence²) et les prix énergétiques augmentent sans cesse (INS 2008). On assiste pourtant à une explosion des voitures individuelles tout terrain très énergivores en Belgique (doublement tous les 5 ans). Le total des véhicules-km parcourus en voiture individuelle augmente de 1 % par an (INS 2008).

Dans un contexte de société de marché, la distribution de l'utilisation finale des ressources existantes tend à suivre la répartition du pouvoir d'achat. Cette relation est moins que proportionnelle car les pays riches apparaissent globalement plus efficaces dans leur utilisation des ressources naturelles (Jackson et Michaelis 2003; Kestemont, Frendo et al. 2011).

Au sein des pays développés, les ménages les plus riches semblent responsables de plus de pollution en raison de niveaux de consommation plus élevés (Wallenborn et Dozzi 2007). Ici aussi, les émissions énergétiques ou l'empreinte écologique ne sont pas exactement proportionnelles aux revenus (Ekins et Dresner 2004; Lepomme et Kestemont 2012).

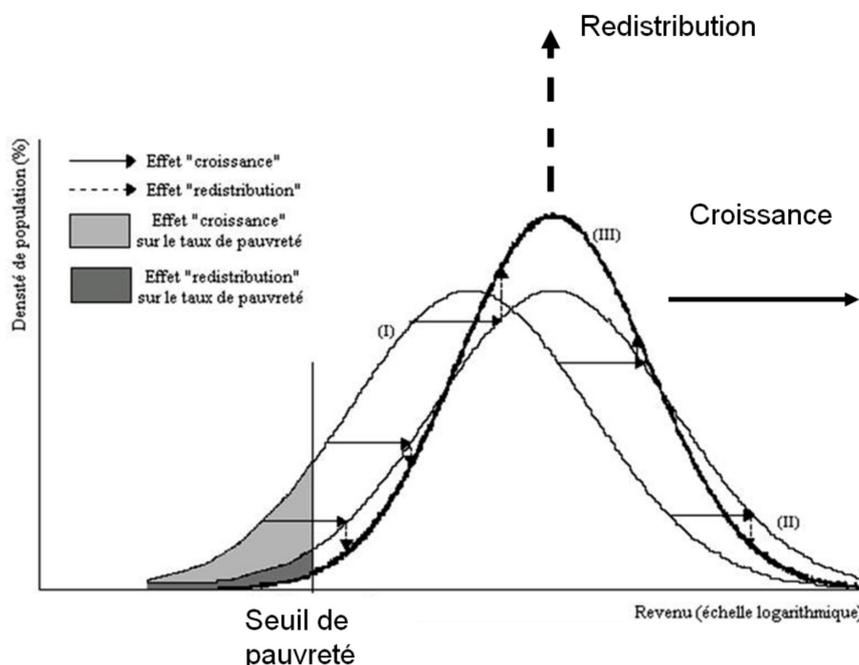
2 <http://www.petrolfed.be/french/chiffres/decomposition.htm>

L'accès aux ressources semble donc empiriquement plutôt bénéficier aux plus riches, tandis que les impacts semblent plutôt nuire aux plus pauvres.

Proposition théorique et options politiques en fonction du type de ressource à partager

Dans un contexte de croissance néoclassique, l'augmentation des disparités de revenu et de pouvoir d'achat (Atkinson, Piketty et al. 2009; Husson 2011; Englert 2012) augmente mécaniquement l'injustice écologique si seuls les mécanismes de marché entrent en jeu. En l'absence de mécanismes correcteurs (normes), la disparité d'accès aux ressources augmente avec la croissance. De même, dans un marché « parfait », la disparité d'exposition aux impacts augmente avec la croissance du revenu moyen. Cette augmentation « automatique » de l'injustice sociale s'opère quel que soient les caractéristiques des ressources considérées (limitées ou non). La figure 1 illustre l'effet mécanique d'une croissance de l'utilisation totale d'une ressource *non substituable*³. A population égale et ressource illimitée, la croissance du revenu moyen (exprimé en quantité de ressource utilisée) peut se faire de deux manières. Soit la croissance n'impacte pas la redistribution (déplacement de la courbe vers la droite, de I à II). Soit, en pratique, il reste toujours des personnes n'ayant pas accès à certaines ressources. La croissance ne peut alors se faire que moyennant une augmentation des disparités. La courbe s'étire alors vers la droite (courbe non représentée). Notons que malgré l'augmentation des disparités, cette croissance diminue automatiquement le taux de pauvreté environnemental (pourcentage de la population sous-alimentée) représenté en gris sur la courbe.

Figure 1 : La courbe de distribution des ressources



Source : auteur d'après Bourguignon, 2003, « The Poverty-Growth-Inequality Triangle », paper prepared for a conference on poverty, Inequality and growth, Agence Française de Développement/EU development network, Paris

³ Cet article ne traite pas des ressources substituables (remplaçables). Dans ce cas, les outils économiques peuvent théoriquement avoir un effet positif en faisant varier les prix relatifs de la ressource et de ses substitut. En pratique, un effet rebond peut annihiler cet effet, mais ce n'est pas l'objet de cet article.

En cas de ressource limitée (toutes autres choses égales par ailleurs), il n'y a pas d'augmentation possible de l'utilisation moyenne. Le seul facteur qui puisse diminuer le taux de pauvreté (par exemple, taux de sous-alimentation) est une redistribution des ressources (par exemple, passer de la courbe II à la courbe III). Dans ce cas, on étire la courbe vers le haut en la resserrant pour garder la population constante (la surface sous la courbe représente la population). C'est par exemple une distribution alimentaire après confiscation des excédents aux pays riches. En libre marché, c'est le pouvoir d'achat qui détermine l'accès aux ressources (une ressource rare augmente de prix). Donc une augmentation de la disparité de revenu change le pouvoir d'achat relatif et favorise une augmentation de la disparité d'accès aux ressources. Comme suggéré par la littérature citée en début de chapitre, cette augmentation de l'injustice environnementale est moins que proportionnelle à l'augmentation de la disparité de revenu. Si l'on veut diminuer la disparité d'accès aux ressources limitées, on est obligé de faire appel à une norme de défense des droits (quotas, triquets de rationnement, droit à l'alimentation, redistribution forcée etc). Le seul jeu de la croissance néoclassique tend vers une injustice environnementale.

Que la ressource soit limitée physiquement *de facto* ou par l'introduction d'une norme globale ne change rien à la démonstration. D'une part un outil économique (taxe etc) n'a aucune influence sur le seuil global et le caractère limité ou non de la ressource. D'autre part, l'outil économique, en changeant la structure des prix versus les pouvoirs d'achat relatifs, n'intervient que dans la disparité d'accès à la ressource, et, dans le cas d'une ressource limitée substituable, dans la vitesse relative d'adoption du substitut. Dans ce dernier cas, rappelons qu'il n'est pas aisé, sinon pas possible de déterminer quel serait le chemin optimal, la meilleure structure de prix relatifs (Martinet et Rotillon 2007), mais telle n'est pas notre question.

Un raisonnement similaire peut être tenu pour la croissance de l'exposition aux impacts, sauf que l'axe des abscisse doit être inversé. En cas d'impact constant, un outil économique opère un transfert des impacts de l'environnement des plus riches vers l'environnement des plus pauvres. En cas d'impact croissant (la courbe évolue vers la gauche), de plus en plus de « pauvres environnementaux » doivent souffrir (mourir ?) de l'impact, tandis que la disparité diminue (de moins en moins de riches arrivent à échapper aux impacts). Les outils économiques permettent dans ce cas de maintenir une plus grande disparité (plus de riches arrivent encore à se préserver contre l'inéluctable accroissement des impacts). En cas d'impact décroissant, la courbe évolue vers la droite au bénéfice de tous. Même dans ce cas, les outils économiques favorisent la disparité.

Discussion

L'effet Veblen

Les outils économiques entendent infléchir la consommation de ressources naturelles en en augmentant le prix. En cas de pénurie ou de limitation normative des ressources ou émissions, cette augmentation de prix risque de faire apparaître la pollution comme un produit de luxe. Dans ce cas, l'augmentation de prix peut avoir l'effet inverse à celui recherché : augmenter la consommation plutôt que la diminuer (Veblen 1899). On peut supposer que l'effet Veblen est en œuvre pour expliquer l'augmentation de l'utilisation automobile (en particulier les 4x4). Il s'agit d'un produit de prestige social. Ici, c'est moins l'augmentation des prix qui joue que l'augmentation du pouvoir d'achat qui permet de démocratiser l'accès à ce symbole de réussite sociale. Les riches ont depuis la révolution française payé pour pouvoir polluer et bénéficier des environnements les plus sains. Dans un cadre d'augmentation des disparités de revenu, ce principe ne risque-t-il pas de jeter dans l'exclusion écologique une

part très importante de la population mondiale ?

Avantages comparatifs

Les échanges de permis de polluer permettent, pour une dépollution totale équivalente, de faire des économies en permettant à celui pour lequel cela revient le moins cher de dépolluer davantage tandis que celui pour lequel cela revient plus cher dépollue moins. Godard (Godard 2005), montre en quoi le mécanisme de flexibilité favorise la coalition dans son ensemble, mais favorise surtout le pays le plus riche en particulier. Le coût marginal de dépollution (reboisement) pour un pays du Sud est plus bas que pour un pays du Nord, en particulierité à cause de la disparité de pouvoir d'achat (monnaie forte contre monnaie faible). Il est moins onéreux de payer des pauvres pour planter des arbres dans un lieu à valeur foncière faible que de forcer des riches à réduire leur niveau de vie. Il est fréquent d'observer en théorie des jeux que l'optimum global favorise le plus fort dans un accord entre un fort et un faible: l'optimum global augmente souvent la disparité entre riches et pauvres si seuls des mécanismes utilitaristes sont mis en œuvre.

Pondération des responsabilités

Les échanges de droits d'émission ont ceci de particulier qu'ils assurent une limitation globale comme cadre restrictif dans lequel se partager des droits, des «parts du gâteau». Dans le cadre de Kyoto, ces droits sont déterminés par pays. Une possibilité est de répartir les droits suivant la population du pays émetteur (CO₂ par personne), ou par unité de PIB (CO₂ par PIB) comme le revendiquent les USA et plus récemment la Chine. Une autre possibilité est de répartir des droits de consommation par personne dans le pays consommateur final des biens finis (y compris leurs émissions au long de leur cycle de production). C'est la notion d'empreinte carbone. Certains auteurs arguent qu'une telle base de négociation permettrait de mettre plus de responsabilité sur les consommateurs plutôt que sur les producteurs. Cela permettrait de diminuer la délocalisation des unités de production tout en attirant l'attention des pays riches sur la nécessité de diminuer leur empreinte de consommation (Lenzen, Murray et al. 2007; Peters 2008).

Référence historique

Les droits nationaux fixés par Kyoto se basent sur une situation historique de 1990 et non sur une notion d'égalité des droits de l'homme. On aurait pu commencer par reconnaître pour chaque homme un droit *inaliénable* d'émettre telle quantité de CO₂ par an et calculer le droit de chaque pays sur base d'une population fixe (Baer, Harte et al. 2000). On estime cette quantité à 0.5-1.8 tonnes de CO₂ par habitant (Godard 2004). Cette approche du droit moyen par habitant est souvent revendiquée par les auteurs issus des pays pauvres. La référence à une population historique fixe permet de maintenir un seuil global d'émission indépendant de l'évolution démographique.

Echange de droits personnels

Une évolution plus récente, que l'on peut mettre en œuvre sur le plan national, est de déterminer des droits individuels (ou par ménage, ou par adulte etc) et ensuite organiser un échange de ces droits personnels (*personal carbon trading ou PCT*). Cet échange peut s'organiser de quatre manières ayant chacune des avantages et des inconvénients: quotas

d'énergie échangeables, allocation personnelle de carbone (*personal carbon allowance*, PCA), plafond et dividende (*cap and dividend*), plafond et partage (*cap and share*) (Starkey 2012). D'un point de vue philosophique, les échanges de droits personnels ne sont pas parfaitement justes, comme développé par Starkey (2012), d'une part parce que l'on peut estimer que certains ont plus de besoins que d'autres, d'autre part en raison du traitement des droits des enfants (s'ils ont des droits, leurs parents peuvent-ils en user?). Le critère d'équité ne permet pas de départager leurs quatre modalités d'application du PCT (Starkey 2012). Sur le plan de l'efficacité, les résultats ne sont guère encourageants et il y semble y avoir plus d'arguments contre ce mécanisme que pour (Starkey 2012).

Evolution des sentiments moraux

Les mécanismes de flexibilité ont aussi pour effet de relativiser le *droit des nations* par la banalisation d'une perception néoclassique de la justice. *Le plus offrant dispose en pratique de plus de droit à polluer que ce qui a été convenu politiquement* puisqu'il peut acheter des droits supplémentaires sur le marché.

Si l'Etat édicte une règle de marchandisation du bien commun (par exemple, une taxe « pollueur-payeur), les sentiments moraux peuvent évoluer vers une diminution du sentiment de responsabilité privée (Ballet, Bazin et al. 2007). Si au contraire l'Etat édicte une interdiction formelle, les jugements moraux ont tendance à suivre, comme cela s'observe pour l'interdiction de fumer dans les lieux publics (Nyborg 2003).

Problèmes de mesure

La littérature montre de nombreux exemples de l'impossibilité de trouver une valeur fiable des coûts ou des bénéfices environnementaux (voir Faucheux et Noël 1995; Spangenberg et Settele 2010). Les services écosystémiques ont une dynamique complexe. Ils agissent souvent en synergie, en parallèle ou en concurrence ce qui crée des double comptes, des omissions, des sur- ou sous-évaluations (Spangenberg et Settele 2010). La valeur de la vie humaine, globalement proportionnelle au revenu dans la littérature, a une grande influence sur les résultats des estimations des coûts sociaux des atteintes à l'environnement (Fierens, Landrain et al. 1998), ce qui ne manque pas de poser des problèmes éthiques et de mesure (Dreze 1999).

La monétarisation des coûts environnementaux est quasi impossible pour ce qui concerne les domaines relevant du futur, ou plus généralement de l'incertitude et de l'irréversibilité: effet de serre, risque nucléaire, biodiversité (Faucheux et Noël 1995; Spangenberg et Settele 2010). Il est pratiquement impossible de privatiser certains biens communs (air, rayonnement solaire) (Ayres 2008). La jurisprudence montre des difficultés éthiques liées aux droits de propriété: les dédommagements vont différer suivant que le propriétaire est l'industriel, un cultivateur ou un éleveur, et suivant la perception de l'intentionnalité supposée de l'acte de polluer (Crocker 1971).

Référence à des expériences positives

Les exemples de gestion du bien commun « hors marché » efficace sont légion. Le droit international protège (sans possibilité réelle de sanction) l'Antarctique et les océans. 20 ans après la signature du protocole de Montréal, la réussite du projet se concrétise par un arrêt total de la production des chlorofluorocarbures prévu en 2010 et une estimation optimiste de la communauté scientifique : la couche d'ozone retrouverait normalement son état de 1980

entre 2055 et 2065 (Wikipédia, 28/9/2012).

A une plus petite échelle, le droit foncier traditionnel africain a protégé pendant longtemps des « bois sacrés ». Dans de nombreux pays la mise en réserve naturelle de zones entières a permis de préserver des écosystèmes et des espèces. Depuis le début des années 70, la Commission européenne a émis un nombre important de législations organisant des normes de concentration (dans l'air, l'eau, le sol) qui obligent à autant de résultats, libre aux Etats d'appliquer les outils qui leur semblent les plus performants. Des produits toxiques ou dangereux sont interdits et retirés du marché. La nouvelle réglementation européenne REACH organise « en routine » ces autorisations ou interdictions pour des milliers de produits chimiques.

Une vaste littérature se développe actuellement autour de réussites de gestion du bien commun, faisant toutes intervenir des normes diverses (normes sociales ou légales) portées par autant d'institutions (de la famille à l'Etat, aux Nations Unies)(Vatn et Bromley 1994; Ostrom 1998; Vatn 2005; Sabourin 2007).

Conclusions

Les outils économiques apparaissent essentiellement neutres en matière de réduction des problèmes écologiques mondiaux.

Mis en œuvre dans des pays qui en ont les moyens et où le système de production est captif (non délocalisable), ils peuvent contribuer à accélérer la recherche de solutions techniques plus propres.

En cas de norme globale ou de rapprochement naturel des limites physiques, les outils économiques ont pour effet une redistribution de l'accès aux ressources naturelles et de leurs impacts:

- redistribution de l'accès direct et indirect, des plus pauvres vers les plus riches
- redistribution des impacts, des plus riches vers les plus pauvres.

Leur effet sur la redistribution intergénérationnelle devrait être étudié. En première approximation, les outils économiques - comme les normes restrictives - peuvent défavoriser les générations présentes par rapport au laisser faire (toutes choses étant égales par ailleurs). Le laisser faire permet en effet de consommer aujourd'hui à moindre coût et sans restriction, des ressources limitées qui, demain, vaudront beaucoup plus cher ou feront l'objet, inévitablement, de rationnements et autres restrictions. Le tout est de savoir si les générations présentes sont actuellement favorisées ou non. Elles profitent de prix encore raisonnables, de normes peu sévères, d'une population limitée et de ressources encore abondantes. Mais elles ne disposent pas encore d'un revenu suffisant (en admettant que la croissance continuera), ni de technologies plus avancées, ni d'une possible diminution de la population, ni d'une diminution possible du consumérisme...

Références

- Alternatives Economiques (2007). Comprendre les économistes. Paris, Alternatives Economiques.
- Arrow, K. J. and G. Debreu (1954). «Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy.» *Econometrica* **22**(3): 265-290.
- Atkinson, A. B., T. Piketty, et al. (2009). «Top Incomes In The Long Run Of History.» NBER Working Paper **15408**.
- Ayres, R. U. (2008). «Sustainability economics: Where do we stand.» *Ecological Economics* **67**(2): 281-310.
- Baer, P., J. Harte, et al. (2000). «Equity and Greenhouse Gas Responsibility.» *Science* **289**(5488): 2287.
- Ballet, J., D. Bazin, et al. (2007). «Green taxation and individual responsibility.» *Ecological Economics Sustainability and Cost-Benefit Analysis* **63**(4): 732-739.
- Barde, J.-P. (1999). Les instruments économiques pour le contrôle de la pollution et la gestion des ressources naturelles dans les pays de l'OCDE : un examen d'ensemble., OCDE ENV/EPOC/GEEI. **9835/REV1/FINAL**,: 141 pp.
- Brons, M., P. Nijkamp, et al. (2008). «A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand. A SUR approach.» *Energy Economics* **30**(5): 2105-2122.
- Chiroleu-Assouline, M. and M. Fodha (2012). «L'environnement au secours de la réforme fiscale.» *La Vie des idées*(24 avril 2012).
- Clerides, S. and T. Zachariadis (2008). «The effect of standards and fuel prices on automobile fuel economy: An international analysis.» *Energy Economics* **30**(5): 2657-2672.
- Comolli, P. (2006). «Sustainability and growth when manufactured capital and natural capital are not substitutable.» *Ecological Economics* **60**(1): 157-167.
- Crocker, T. D. (1971). «Externalities, property rights, and transactions costs: an empirical study.» *The Journal of Law and Economics* **14**(2): 451-464.
- Daly, H. E. (1973). *Towards a Steady-State Economics*. San Francisco, CA., W.H. Freeman.
- Dreze, J. (1999). «La valeur de la vie humaine dans les décisions économiques.» Louvain **100**: UCL.
- Ekins, P. and S. Dresner (2004). *Green Taxes and Charges - Reducing their Impact on Low-Income Households*, Joseph Rowntree Foundation.
- Englert, M. (2012). «Impact de la Croissance Economique sur la Pauvreté et les Inégalités.» *Statistics Belgium Working Papers* **23**: 185.
- Faucheux, S. and Noël (1995). *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*. Paris, Armand Colin.
- Fierens, A., V. Landrain, et al. (1998). *Evaluation des coûts externes liés à la pollution de l'air produite par le chauffage des logements en Belgique*. Bruxelles, CEESE-ULB: 130 pp.
- Georgescu-Roegen, N. (1975). «Energy and Economic Myths.» *Southern Economic Journal* **41**(3): 347-381.

- Georgescu-Roegen, N. (1979). «Energy Analysis and Economic Valuation.» *Southern Economic Journal* **45**(4): 1023-1058.
- Godard, O. (2004). L'équité dans les négociations post-Kyoto: critère d'équité et approche procédurale.
- Godard, O. (2005). A la recherche de l'équité dans la formation d'un régime international du climat: réflexions pour l'après-Kyoto. Colloque international «Vivre ensemble au XXIème siècle», Institut de sociologie, Université Libre de Bruxelles, ULB.
- Gowdy, J. and J. D. Erickson (2005). «The approach of ecological economics.» *Cambridge Journal of Economics* **29**(2): 207-222.
- Hartwick, J. (1977). «Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources.» *American Economic Review* **67**(972): 974.
- Hecq, W. and B. Kestemont (1991). «A model of emission trading for minimizing the cost of air pollution control from Belgian power plants.» *Journal of Environmental Management* **32**(4): 367-382.
- Hotelling, H. (1931). «The economics of exhaustible resources.» *Journal of Political Economy* **41**(1): 28.
- Husson, M. (2011). «Les inégalités à l'échelle mondiale.» *Chronique internationale de l'IRES* **130**.
- INS (2008). Mobilité. Bruxelles, SPF Economie. **2008**: Statistiques de la mobilité.
- Jackson, T. and L. Michaelis (2003). *Policies for Sustainable Consumption*. London, Sustainable Development Commission.
- Kahneman, D. (2003). «La psychologie peut éclairer l'économie.» *La Recherche*(365): 67-70.
- Kahneman, D. and A. Tversky (1979). «Prospect theory: An Analysis of Decision under Risk.» *Econometrica*(47): 293-291.
- Kesler, S. E. (1994). *Mineral Resources, Economics and the Environment*. New York, Macmillan Co.
- Kestemont, B. (2008). «Les fondements utilitaristes et anti-utilitaristes de la coopération en biologie.» *Revue du M.A.U.S.S.* **31**: 242-269.
- Kestemont, B. (2010). *Les indicateurs de développement durable. Fondements et applications. / Indicators of sustainable development. Fundamentals and applications*. IGEAT. Bussels, Université libre de Bruxelles: 256.
- Kestemont, B. (2011). *Les hypothèses néoclassiques et la soutenabilité. Autour de Tim Jackson. Inventer la prospérité sans croissance. Première partie. Etopia*. Namur, Les éditions namuroises, Namur. **8**: 151-183.
- Kestemont, B. (2012). «Un dollar une voix ? Limites de l'internalisation des couts environnementaux.» *La Revue Nouvelle Mars* **2012**(3): Mars 2012.
- Kestemont, B., L. Frendo, et al. (2011). «Indicators of the impacts of development on environment: A comparison of Africa and Europe.» *Ecological Indicators* **11**(3): 848-856.
- Lenzen, M., J. Murray, et al. (2007). «Shared producer and consumer responsibility -- Theory and practice.» *Ecological Economics* **61**(1): 27-42.
- Lepomme, M. and B. Kestemont (2012). *The ecological footprint of food, car use and domestic energy by revenue decile in Belgium*. 18th Annual International Sustainable Development

Research Conference, Hull, UK.

- Martinet, V. and G. Rotillon (2007). «Invariance in growth theory and sustainable development.» *Journal of Economic Dynamics and Control* **31**(8): 2827-2846.
- Mauss, M. (1924). *Essai sur le don, forme et raison de l'échange dans les sociétés archaïques*. Paris, P.U.F.
- Nyborg, K. (2003). «The impact of public policy on social and moral norms: some examples.» *Journal of Consumer Policy*(26): 258-277.
- Ostrom, E. (1998). «A behavioral Approach of the Rational Choice Theory of Collective Action.» *American Political Science Review*, **Vol 2**: 1-22.
- Peters, G. P. (2008). «From production-based to consumption-based national emission inventories.» *Ecological Economics* **65**(1): 13-23.
- Peters, G. P., J. C. Minx, et al. (2011). «Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008.» *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Postel, N. (2007). «Hétérodoxie et institutions.» *Revue du M.A.U.S.S. semestrielle* **30**: 69-101.
- Rockström, J. (2009). «A safe operating space for humanity.» *Nature* **461**(7263): 472-475.
- Sabourin, E. (2007). «L'entraide rurale, entre échange et réciprocité.» *Revue du M.A.U.S.S.* **30**: 123-142.
- Spangenberg, J. H. and J. Settele (2010). «Precisely incorrect? Monetising the value of ecosystem services.» *Ecological Complexity*
- Ecosystem Services. Bridging Ecology, Economy and Social Sciences* **7**(3): 327-337.
- Starkey, R. (2012). «Personal carbon trading: A critical survey Part 2: Efficiency and effectiveness.» *Ecological Economics* **73**(0): 19-28.
- Starkey, R. (2012). «Personal carbon trading: A critical survey: Part 1: Equity.» *Ecological Economics* **73**(0): 7-18.
- Vatn, A. (2005). «Rationality, institutions and environmental policy.» *Ecological Economics*(55): 203-217.
- Vatn, A. and D. W. Bromley (1994). «Choices without Prices without Apologies.» *Journal of Environmental Economics and Management* **26**(2): 129-148.
- Veblen, T. B. (1899). *The Theory of the Leisure Class, The forgotten books*.
- Wackernagel, M. and W. E. Rees (1996). *Our Ecological footprint: Reducing Human Impact on the earth*. Philadelphia, New Society Publishers.
- Wallenborn, G. and J. Dozzi (2007). *Du point de vue environnemental, ne vaut-il pas mieux être pauvre et mal informé que riche et conscientisé? Environnement et inégalités sociales*. P. Cornut;, T. Bauler; and E. Zaccai. Bruxelles, Editions de l'Université de Bruxelles: 47-61.
- WWF (2010). *Living planet report 2010*. Gland, WWF.

The governance potential of ecosystem services research in Belgium

Hans KEUNE^{*123}, S. JACOBS^{*3}, T. BAULER⁴, J. CASAER², T. CERULUS⁵, B. DENAYER⁶, N. DENDONCKER⁷, H. DENEEF⁸, I. LIEKENS⁹, A. PEETERS¹⁰, T. SCHEPPERS², I. SIMOENS², J. STAES³, F. TURKELBOOM², K. VAN DER BIEST³

¹ Belgian Biodiversity Platform; ² Research Institute for Nature and Forest (INBO); ³ University of Antwerp; ⁴ Université libre de Bruxelles; ⁵ Flemish Government, Environment, Nature and Energy Department; ⁶ Agency for Nature and Forest (ANB); ⁷ Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix (FUNDP); ⁸ Flemish Land Organisation (VLM); ⁹ Flemish Institute of Technological Research (VITO); ¹⁰ Research centre for a Sustainable Rural Development and Ecosystem Management (RHEA);
* Corresponding authors: hans.keune@inbo.be & sander.jacobs@ua.ac.be

Introduction

In this paper we will introduce the concept of ecosystem services and how it is finding its way in Belgium research. We will specifically focus on the governance potential of the concept. The main question we try to answer is: what is the governance potential of ecosystem services research in Belgium? We will do this by introducing several main ecosystem services related research projects and try to characterize them in terms of governance aspects.

1 We will briefly introduce the roots of the ecosystem services concept and its relation to sustainability. 2 We introduce general governance issues. 3 We introduce the Belgian ecosystem services community. 4 We present eight Belgian ecosystem services research projects of members of this community. 5 We try to characterize based on these governance descriptors. After that we will draw some conclusions.

1. Ecosystem services and sustainability

Throughout history, references to our dependence and influence on natural resources abide (Daily et al 2007). The current ideas on ecosystem services probably arose when Marsh (1864) pointed out the finiteness of soil fertility in the Mediterranean area (Marsh 1864). It took over 80 years before these ideas resurfaced in the work of Osborn (1948), Vogt (1948), and Leopold (1949) who redrew attention to human dependence on ecosystems with the concept of natural capital. Later on, Ehrlich et al (1970) more explicitly warned for *'the most subtle and dangerous threat for human survival [...] the potential destruction, by humans themselves, of the ecological systems of which the entire existence of the human species depends'*. In that same year, the term "ecosystem services" (ES) was coined in the *Study of Critical Environmental Problems*, (SCEP 1970), which included descriptions of several services. Daily (1997) provides a terminology overview, but the ES-concept, as a science-policy interface concept, is continuously refined and debated even today. The *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA 2005), a study by the United Nations which took four years and involved over 1300 scientists, drew political and public attention to the concept. Recently, The Economy of Ecosystems and Biodiversity (TEEB), a study involving even more scientists and policy makers, further broadened the scope of disciplines involved. Valuation of ES is now being studied, debated and applied as decision support to develop better management of our natural resources.

The research field of ES is deeply rooted in sustainability thinking. The more explicit mentioning of sustainability in relation to ES can for example be found in Costanza and Folke (1997), who distinguish three values of ES: ecological sustainability value, economic efficiency value and social fairness value. The final goal of ES identification and valuation is to realize a more sustainable resource use, contributing to well-being of every individual, now and in the future (MEA 2005). When valuing for sustainability, it is essential to respect sustainability principles. The Brundtland Commission defined sustainable development as *'development that meets the needs of current generations without compromising the ability of future generations to meet their own needs'* (Our Common Future, 1987). The concept supports strong economic and social development but at the same time it underlines the importance of protecting the natural resource base. Ecologically, this means that the consumption rate of goods and services should be assessed in light of their (global) renewal rate. Consumption rates higher than natural resources production rates are inherently unsustainable. Socially, intergenerational solidarity is a crucial issue: all development has to take into account its impact on future generations. This solidarity should be envisaged at the global level. Norgaard (2010) mentions that sustainability is ultimately a matter of environmental justice within and between generations. This ethical principle has to be implemented during the valuation process. The practical valuation process must therefore be a collective process engaging the relevant actors of society concerned with the issues at stake (e.g. Vatn 2009).

2. Ecosystem services governance

With the introduction of the concept of *ES*, proponents of nature and biodiversity conservation aim to demonstrate the importance of nature and biodiversity for mankind (e.g. Cowling et al. (2008) call it a *mission-oriented discipline*). As such, the conservation community hopes to convince society of the need and urgency to take action. A dominant strategy for this purpose seems to be one way conviction by means of establishing an evidence base. The question is if this is realistic. In trying to connect this body of evidence and conviction to 'others' and 'their' way of doing things (individual or household or company behaviour, governance in different sectors and at different levels), this largely one-way communicative approach seems to underestimate its limitations: the issue of ES is only partly a knowledge (or scientific or 'truth') issue, it is also an issue of social debate and of governance.

Whereas *governing* refers mainly to governmental steering and top down management of society, *governance* refers more to the social process of acting, interacting and decision making. Lee (2009) refers to it as social coordination: *"solving social problems by coordinating interactions of various actors"*. This means that it is not necessarily limited to formal governmental institutions or the work of policy makers only. It could also refer to corporation management or local communities, or even households. As all of these actors potentially play a role in or are influenced by ecosystem governance, or can be considered actors and/or stakeholders in other societal domains, sectors, activities that (potentially) have some relation to ecosystems and their services, it is clear that we may speak of a potentially rather complex constellation, linking quite some diversity of contexts, actors, interests and relations. Moreover according to Jordan (2008) *"governance is not normally tied to a particular period of time or geographical place; it is a concept that travels easily across these categories"*, in other words *multilevel governance* (Hooghe and Marks 2003). The challenge of how to institutionally arrange ecosystem governance urges us to pose and try answer quite some important questions such as:

- *What* to govern: nature and society; issues, problem framing; policy options, priorities, ...;

- *Who* is relevant: stakes, power; benefits, burdens;
- *Who* should be involved: which groups, actors, stakeholders;
- *When* should actors be involved: e.g. at which phase of the governance process, such as issue/problem framing, research/process design, research, social/policy interpretation, definition of policy options, prioritization, practical action, evaluation;
- *Where* should actors be involved: e.g. which policy level, spatial scale or sector of society;
- *Why* should actors be involved: e.g. do we involve local actors because they have a democratic right to be involved or because we need their support for the legitimacy of the governance process, or because we need their local knowledge or because we want to raise their awareness?
- *How* should actors be involved: e.g. voluntarily, top down or bottom up, by which rules, how is power distributed;
- *Based on which information*: which and whose data or knowledge.

According to several authors (Vatn 2009; Norgaard 2010; Smith and Stirling 2010; Wilkinson 2011; Voß and Bornemann 2011) such are perhaps the most pressing, urgent and least developed challenges of (new) institutional arrangements in ecosystem governance. This paper reflects on several Belgian ES projects and cases using the above mentioned governance questions as governance descriptors as to characterize the governance related aspects.

3. The Belgium Ecosystem Services (BEES): from science cluster to community of practice

The Belgium ecosystem services (BEES) cluster project (2009 - 2012) aimed to deliver an overview of the issues at stake, from environmental, economic to sociological perspectives, to bring together scientists involved in ES research, policy makers and other stakeholders, and to advise on priority research and actions needed to come to an adequate strategy on sustainable management of these vital assets to human well-being. This project, though largely focusing on scientific issues, expanded on the exploration of the need for socially and policy-relevant knowledge. Capitalizing on this project, the emerging BEES community aims to further engage a variety of Belgian policy and private sector representatives and other stakeholders as to improve the societal relevance of future scientific work through close consultation and collaboration. It further aims to build bridges to other sectors in society, such as the business sector, in order to collaborate in practice-oriented projects.

On April 26th of 2012 during a round table discussion, a group of Belgian actors from science and policy convened and decided to establish a Community of Practice (Wenger and Snyder 2000) on ES in Belgium. The round table participants agreed upon the following aims of this BEES community:

1. Develop mainstreaming & policy tools, to promote the acquisition of an improved knowledge on the uptake of ES concepts in policy and management, business and society;
2. Facilitate capacity building, exchange of expertise and experience, to enable involvement of Belgian actors in international initiatives and build the capacity to conduct assessments of ES;
3. Provide overview of state of the art knowledge and best practices.

The BEES community is an open and flexible network that serves as interface between different societal actors. It is open to all organisations, and informal in its functioning, organisation and membership. Its activities are demand-driven, responsive to societal needs, and it promotes engagement of Belgian ES experts in relevant national and international initiatives, such as, the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), the EU Working Group on Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES), The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) and the Ecosystem Services Partnership (ESP). The BEES community is supported by a secretariat facilitated by the Belgian Biodiversity Platform.

4. BEES-community projects & cases

Eight projects/cases are presented in which BEES-community members developed, analysed and/or applied concepts of ES in concrete cases. Project/case representatives were asked to especially focus on the following issues: project/case issue; project team; results; original objectives, formulated by whom; methodological and conceptual choices and developments; actor inclusion; project/case development; impact; self-assessment.

4.1 Valuation Of Terrestrial Ecosystem Services in a multifunctional peri-urban space (VOTES)

The VOTES project was a two-year project funded under the BELSPO science for sustainable development call. Researchers from the University of Namur, VUB, ULG and INBO were involved. The main objective of the project was to quantify the importance of key ES for four municipalities in central Belgium by integrating social, biophysical and economic valuation exercises involving stakeholders, and taking into account scenarios of climate and land use change. Outcomes of the valuation exercises were meant to feed in the local decision-making process related to landscape planning. The study aimed to balance scientific and policy objectives though only scientists designed the project.

The social valuation consisted of around 50 individual interviews. 30 ES were ranked and scored by the respondents. The main result is that all respondents had a positive stance towards nature. However, the definitions of nature raised by the respondents can be quite different. Apart from the ranking of the ES, we were able to get an insight in issues locally at stake in land use and land management (e.g. pressure of urbanisation, high relevance of flood protection and protection against erosion). During the biophysical assessment, a digital vegetation model was coupled with an agent-based model of farmers' decision making to produce parcel-level maps of land use and vegetation change, which were converted into indicators of five ES. In the economic valuation exercise, three ES were valued using the travel cost method and a deliberative approach. The results of the three exercises were then integrated in a matrix that was presented to stakeholders in two final workshops.

Due to lack of time and resources, the matrix was largely incomplete as many ES could not be valued either biophysically or monetarily. The main difficulty was that the biophysical valuation is time consuming, but the level of detail and accuracy achieved greatly exceeds results obtained using a more classical approach that directly associates land use (or cover) to ES provision. The project was however truly transdisciplinary, and each team provided a key building block in the project to make sure coherent results were achieved.

Stakeholders were involved at all stages of the project except during its conception phase. Over 100 people were interviewed for the social, biophysical and economic valuation.

Group valuation was also performed. Public administrations, consultancy bureaus, scientific experts working on Strategic Environmental Assessment (SEA) and politicians were consulted. The main results were then presented to a subset of stakeholders in two final workshops.

The stakeholders and decision makers (including the mayor of one municipality) were interested by the project and its results but it is too early to assess if the study had impact on decision-making. We therefore suspect that the study was too incomplete to have real impact. If we had had a more complete table of modelled ES it could have been used for multi-criteria decision-making. However, if the project had to be re-done, we would recommend it to be co-constructed with key stakeholders including decision makers. A major challenge is to keep them involved throughout the project. We think however that the framework designed is useful and could be implemented elsewhere. The main challenges are to combine methods and results' accuracy (e.g. in the biophysical modelling exercise) with time constraints and to find appropriate ways of communicating the results to stakeholders so that they can be used as part of a multi-criteria decision making process. The VOTES project was a first step in that direction.

4.2 ECOFRESH

Freshwater systems are one of the most threatened ecosystems in the world, despite their unique biodiversity and the important ES they deliver. ECOFRESH (a two-year project funded by BESPO) is one of the first attempts in Belgium to evaluate freshwater ES in monetary and other terms. Partners of the project were: ECOBE University of Antwerp (coordinator), Catholic University of Leuven, Flemish institute for technological research VITO, Ghent University and the Research Institute for Nature and Forest INBO.

The project provided insight into the importance and the functioning of freshwater ES in Belgium, and delineated opportunities on how to integrate the concept on the institutional level. The project aimed to provide a methodology to study freshwater ES and their benefits and to mainstream the concept into policy. In order to achieve this, innovative scientific research was performed that resulted in the development of two transparent tools that – provided some further improvements – can be used in real-life contexts.

Two Bayesian based models were developed that allow assessment of the bundles of ES delivered by (1) rivers and (2) ponds. While the original aim was to upscale the models from a selection of ES to the entire bundle of services and from a single pond to the multi-pond complex, the complexity of ecosystem processes and the scaling issue in monetary valuation revealed to require much more in depth research in order to come to a fully integrated model.

While an exhaustive list of stakeholders, policy makers and experts was invited to join the follow-up committee of the entire project, the attendance was rather low and the majority of the participants had a scientific background. Although their input was very valuable in terms of state-of-the-art research, some opportunities like participatory model development and model validation were missed. A different approach is needed to incite local stakeholders, for example with a more concrete description of their role and of the model's applications. However, on the level of the work packages it was easier to involve citizens (economic valuation), policy actors and local stakeholders (social assessment) by means of focused questionnaires and interviews, and case-study specific consultation rounds.

The activities in the frame of ECOFRESH arouse the interest from policy makers on different levels. In 2012, the Agency of Nature and Forests (ANB) commissioned VITO and UA to identify, quantify and value ES in Natura2000 Special Protection Areas. Also in 2012, UA and

INBO started a research on ES in the land dune region adjacent to the river case of ECOFRESH for the Province of Antwerp. Moreover, methodologies are being applied and further developed in the ECOPLAN project (see further).

4.3 "De Wijers": application of the ecosystem services framework for sustainable area development

De Wijers is an area located in the province of Limburg in the north-east of Flanders (Belgium), covers 20.000 ha and is spread out over 7 municipalities. The landscape between the villages, cities and industrial areas consists of (fish) ponds, marshes, forests, heaths and grassland. The region is extremely rich in biodiversity (two important Natura 2000 areas), unique landscape and cultural heritage. Consequently, De Wijers has several tourist attractions and recreational activities. It was widely felt that ad-hoc developments in this region hinders to achieve its potential.

In February 2010, all involved parties agreed that in order to make full use of the potential of this area, there is a need for a broad supported vision and master plan for De Wijers. Therefore, the Governor of province Limburg requested the Flemish Land Organisation (VLM) to coordinate such an initiative. As a result, the Wijers project was started by 14 partner organisations and an interdisciplinary core project team was established. An ES approach was adopted as a guiding framework for several reasons: it was felt that ES stimulate positive thinking (focus on the possibilities, rather than problems), it was expected to stimulate multi-sectoral thinking, and it was considered as a suitable vehicle to achieve resilient and multi-functional landscapes. However, the term ES was hardly used in the workshops, and was translated into practical terms which relate to the experience of participants (e.g. benefits of landscape, dependence on the natural environment). The main strategy to build a widely-supported vision was a series of interactive workshops: one focused on recreation and tourism, one on provisioning and regulatory ES, and one on socio-economic development. For each workshop, representatives of all relevant sectors were invited. The outcomes of the workshops were used to build a common vision. This initiative was in the first place a development project, where INBO researchers supported the VLM staff in how to use ES in regional planning. In other words, this was real action research, where the main scientific output is a methodology for mainstreaming ES. The lessons-learned can be summarized as follows:

- **Process:** Due to the open and participatory design of the workshops, all who participated in the workshops had ample opportunities to express their opinions. Even though participants had very different backgrounds and stakes, discussions were respectful and constructive. This approach stimulated social learning among partners, increased understanding for other positions, enabled networking, and contributed to higher trust between stakeholders.

- **Inclusion:** In total 200 people participated in the workshops (mainly Wijers project partners, governmental agencies and NGO's). The environmental, nature, tourism and fishery sectors were well represented, whereas it was much more difficult to mobilise representatives from industry, agriculture and the social sector.

- **Approach:** The strength of employing the ES concept as a vehicle for vision development was that it was easy to understand, that it was very inclusive, and that it stimulated participants to reflect about the structures and processes that provide the services which are important for them and for other sectors. By asking participants to list desired benefits for the future (2030), participants were enabled to think more freely, and as such we avoided to be bogged down in current problems and conflicts. Scoring and prioritization were found to be simple, yet helpful tools to structure the different opinions. Another powerful tool was the question to identify

potential win-win situation between desired services. This enabled to build bridges between (sometimes disconnected or even contradicting) sectors. A limitation of the ES concept for regional planning is that it focuses mainly on the contribution of ecosystems to regional development. Other elements, such as employment, transport, regional character, cultural heritage also came up as important vision elements, but could not directly be linked to the ES concept. The participatory approach also runs the risk that 'invisible' ecosystem processes fall from the radar during a participatory process (e.g. groundwater dynamics)..

VLM staff used the vision elements and possible win-wins from the workshops as building blocks for a potential vision for 'De Wijers'. When these were presented to individual representatives of the respective sectors, several reservations were encountered. As a result, the ambition level was somehow reduced, and the master plan document was reformulated into "Challenges for De Wijers", listing a number of options for the future. In May 2012, the result was presented to the public and a declaration of commitment was signed by the partner organisations. In 2013, the project will focus on the operationalization of the workshop outcomes.

Overall, this was a very interesting pilot of bottom-up mainstreaming of ES in regional planning. The concept and the used approach can certainly contribute to vision development, especially for regions with complex land-use and many involved stakeholders. However four elements will need special attention: the inclusion of powerful but less concerned partners, inclusion of invisible services and services which are not ecosystem-related, and efficient use of workshop time.

4.4 Nature Value Explorer

The Environment Administration of the Flemish government (LNE) commissioned a study in 2009 to quantify and value in monetary terms the ES of (semi)-natural land use, including forests. The objective was to develop scientifically sound functions/values of several ES for environmental impact assessments and cost benefit analyses related to infrastructure works. An interdisciplinary team of economists and ecologists of VITO, ECOBE (university of Antwerp) and IVM (Free University of Amsterdam) went at work to translate existing scientific information towards workable methods for policy use. Partly new research on the amenity value of ES was conducted. The original objective was broadened towards valuing changes in ES in general (not per se linked to infrastructure projects). As the used value function transfer approach proved to be more difficult to implement than an unit approach and the use of the manual sometimes lead to misinterpretation of methods, a supportive web tool "natuurwaardeverkenner" or "nature value explorer" was designed. This calculation tool can be freely consulted from <http://rma.vito.be/natuurwaardeverkenner> (in Dutch). The tool contains amenity and non-use values and some regulating services (water quality regulation, impact on air quality, climate change (C-sequestration) and noise mitigation by forests). The tool combines site specific inputs with generic quantification and valuation functions.

A large challenge for practical tools is that they need to be rather simple, user-friendly, transparent and flexible to address future questions and include new insights. On the other hand, they also require a high accuracy and scientific reliability. Therefore, different policy actors were involved through a steering committee during the project. Citizens were involved in the valuation studies through focus groups and surveys. Another challenge for the Nature Value Explorer is that the exact needs are end-user specific. Some end-users envision direct and straightforward applications while other see this more as explorative research that is needed for mind setting and informal influencing. Advocating benefits of specific policies is

often considered equally important as improved decision making and science-based selection of policy measures. The first edition of the manual and tool were launched end of 2011. The administrations and consultancies are well aware of its existence. There is an enthusiastic user group of 200 people. The tool was already used in small scenario studies by consultants and also by environmental organisations to prove the value of threatened nature areas by large infrastructure works. The big case studies still need to come. In a user survey there was a large call for more interaction (forum) between users and a request for increasing the functionalities of the tool. Methodological and IT developments are foreseen in the upcoming years to meet the requests of the users to bring in more ES, update the existing ones with new scientific information and simplify the scenario analysis. Lessons learned are that interaction through the entire period with different stakeholders is essential to assess their needs and keep them involved. Also, the tool needs to be build in such a way that it is easily adaptable to new requirements and scientific insights.

4.5 ECOPLAN

ECOPLAN (Planning For Ecosystem Services) is a 4-year, 300 person months research project which is funded by the Flemish government agency for Innovation by Science and Technology and will start in January 2013. ECOPLAN aims to develop spatially explicit information and tools for the assessment and valuation of ES and the evaluation of functional ecosystems as a cost-efficient and multi-purpose strategy to improve environmental quality. We will develop open-source end-products and knowledge to identify, quantify, value and validate-monitor ES. The research groups that backbone ECOPLAN cover a large knowledge basis and associated (spatial) datasets on environmental quality, land-use, ecology, hydrology, soils, remote sensing. Multiple disciplines as ecology, economy, sociology, and geography are all present within the consortium. The project partners are the Ecosystem Management Research Group (ECOBE) from the University of Antwerp (coordinator), the Leuven Sustainable Earth Research Centre (LSUE) from the Catholic University of Leuven, the Environmental Modelling Division (RMA) and the Earth Observation Unit (TAP) from the Flemish Institute for Technological Research VITO, the Aquatic Ecology Research Unit (AECO) from Ghent University and the Research Institute for Nature and Forest (INBO). The project is in the initial phase but the project objectives were directly inspired by the explicit needs from policy end-users. 26 organisations were consulted during an intensive pre-trajectory to inquire about their needs and vision on the use of the ES-concepts. The list of end-users is a mix of policy preparation, -execution, -evaluation, and civil society organisations. Many of them are active in multiple fields. All actors with a prominent role in land use management in Flanders (recreation, agriculture, nature, water management) were covered. The interest in the ecosystem service concept, among all actors, strikingly goes towards spatial planning, agriculture, land and water management. All end-users consider a more in-depth knowledge of ES as added value for policy making. The needs of these organisations range from direct and straightforward applications to explorative research for mind setting and informal influencing.

There is a clear need for domain- and authority-independent tools, open to many end-users, which can be tailored for specific needs. There is also a recurring need for simple, user-friendly operational decision support tools/instruments with a high accuracy/reliability. Since trade-offs between accuracy and applicability are unavoidable, ECOPLAN will follow a tiered approach providing both detailed and generalized quantification and valorisation functions & models. ECOPLAN will develop this as end-products with different levels of complexity and accuracy, each having their own application field. With this layered approach the different target groups will be reached. Firstly, the group of end-users that are mainly interested in the

integrative and holistic approach of the ES-concept. They wish to apply the concept to achieve more cross-policy cooperation and more cost-effective environmental policies in general. Secondly, end-users which are engaged to effectively implement the ECOPLAN products in policy implementation and planning. Thirdly, end-users that have stakes in one (or more) of the three policy domains (water, nature, agriculture). These end-users include organisations from lower administrative levels, specific sub-divisions of the environmental policy administrations and several cross-cutting NGO's and civil society organisations. The fourth and final group of end-users are the consultants. They are interested in the partial products of ECOPLAN for use in applications that relate to project development, environmental impact assessment, societal cost-benefit assessments, In general they expect the trend of policy rationalization to further continue and see a growing role for consultants to provide such studies/reports.

4.6 Ecosystem service Bundle Index (EBI)

The Ecosystem service bundle index is a prototype of a tool developed to capture ecological complexity of delivery of ecosystem service bundles. Rather than providing a prescription of the ideal land-use, it aims to inform decision makers by demonstrating the consequences of land use choices in a given landscape context. The tool was developed by ECOBE University of Antwerp and Ghent University in the extension of the BELSPO funded project ECOFRESH. The original aim of the study was to explore the opportunities of the usage of Bayesian belief networks in ecosystem service research. The research resulted in the development of a prototype decision supportive tool in which a weighing function is added to the basic Bayesian network to allow assessment of bundles of ES. The aim was to construct the model with only empirical quantitative data. Due to the lack of accurate quantitative data for all parameters, however, the prototype was developed as a semi-quantitative tool which is based on a mix of existing quantitative and qualitative research data as well as expert judgment. While the construction of the prototype model entirely relies on scientific knowledge, making it a credible tool applicable on the management level requires the input of stakeholders' expertise at different levels of the model development. Especially the lack of quantitative data, which is often the case in ecosystem service research, and the capacity of Bayesian belief networks to make accurate predictions when input data is uncertain, makes the involvement of stakeholders favourable.

Input from stakeholders is not only required to define causal relationships between variables and ecosystem service delivery. As the demand for ES is locally (and temporally) variable, the composition of the bundle of services is a societal decision too. Therefore, the final index can be severely influenced by the weighing function. In the prototype this weighing is driven by a purely hypothetical management strategy but stakeholder participation is strongly recommended in order to make it applicable in real-life contexts. Not only development of the model but also model validation can be performed based on stakeholder participation. In this research, the applicability of the methodology was evaluated during a field validation exercise involving local experts, practitioners and land owners. Although this is a common technique used in Bayesian modelling, it might raise some dispute in purely scientific environments. As the model is still a prototype version, application on the institutional level is not yet expected. Such a prototype, however, is useful to test the basic functioning of the model and can serve as a conceptual framework during the participatory rounds. One of the difficulties to be expected is the translation of the scientific and technical details of the models towards a non-scientific audience. In order to get the maximum out of the participatory rounds, participants need to fully understand the functioning of the model.

4.7 Impact of global trade on ecosystem services: the case of soybean import

In the framework of the BEES project funded by BELSPO on the impact of global trade on ES and biodiversity, RHEA and the University of Antwerp collaborated for deepening a case study: the massive and relatively recent development of soybean crops in Argentina and Brazil, the resulting exports of soybean and soybean cake to Europe and the environmental consequences in South America and in the EU. Imports of these protein-rich feedstuffs in Europe developed after the 'Dillon Round' of the General Agreement on Tariff and Trade (GATT) negotiations in 1962-1963. The negotiation conclusions included the acceptance by European negotiators of free-tax imports of protein-rich feedstuff for animal feeding. That induced a fast increase of industrial monogastric (pig and poultry) production and blocked any further development of legumes and protein crops in Europe. Soybean was first imported from the United States of America and many other feedstuff types were imported from a large group of countries. Since 1961, feed imports by EU countries increased a lot and soy became progressively the main product of feed imports (83% in 2008). Imports of other commodities decreased. Brazil, Argentina and USA are now the main export countries for the EU-27.

Before the study, the protein dependence of the EU and the trend of the evolution of feed imports was known but not quantified. The case study analyzed the evolution of animal feed (including soybean and soybean cake) imports in the present member countries of the European Union (EU-27) between 1961 and 2008 and discussed the consequences on ES in South America and in Europe. The consequences on the health of EU citizens were also qualitatively analyzed.

The project is the first attempt to make a synthesis for all animal feeds and for a so long period (1961 – 2008). It produced a comprehensive database on animal feed imports (total volume of commodities; energy, N and P equivalent) and a database on land use changes in Argentina and Brazil (destruction of forests and grasslands, development of the soybean cropping area). It estimated the equivalent of feed imports in terms of European grasslands area (calculated on the basis of energy and protein value). It analyzed the impact of ES in Argentina and Brazil, calculated on the basis of land use changes and valued in euro. A qualitative assessment on human health in Europe was made. It can be concluded that a considerable progress in the state-of-the-art has been achieved. The project also analyzed policy scenarios and formulated policy recommendations. The case study has indeed a lot of policy implications (protein independence of the EU in animal and human feeding; implications on the Common Agricultural Policy; consequences on human health policy).

The project used a FAO database crossed with several other data sources from the agro-food sector and environmental NGOs. An important handling of data was necessary and tests of data reliability were made. Several choices were made on the calculation of the value of ES. Calculations of Payment for ES, profitability of economic alternatives and hidden costs were mainly used instead of simple monetary costs of deforestation, the profit of soy production, or a Pigouvian tax on soy. The main difficulties arose from the lack of reliable data and order of magnitude for the values of ES in this very innovative topic

Data and conclusions will be disseminated through at least two European research projects. They will be presented to the European Commission in workshops in 2013. Results will be published and disseminated in different medias. A lot of positive feedbacks were received from scientists who were very interested and enthusiastic about the novelty of the information.

4.8 Wild boar management project Limburg

This project aims for the organisation of collaborative adaptive management of wild boar. Till recently wild boar were absent for more than 50 years in Flanders with the exception of the region of Voeren. Since 2006 wild boar appeared in different parts of Flanders, presumably due to illegal introductions. Since then the wild boar population is rising rapidly, because of mild winters, the increase of corn farming (providing both food and cover for the wild boar during a long period of the year) and other reasons. More and more the rising wild boar population is causing problems in the area, such as farm land/crop destruction and traffic accidents, which might develop in an even more problematic situation if no effective actions are taken. This is causing increasing dissatisfaction with affected parties. Therefore the decision was made to start an experimental adaptive co-management project in two pilot areas in the province of Limburg where the wild boar are currently present in the highest numbers. The governmental Agency for Nature and Forest (ANB) of the province of Limburg is taking the lead in this process, supported by ANB Flemish head office and INBO. As such, this typically has become an issue for multi level governance, including both the local level (local actors and municipalities), provincial and Flemish governmental level. INBO assists both on wildlife management issues, collaborative and participatory approaches, and on the participatory development of an integrated multi-criteria decision support framework involving criteria and indicators.

The project initiative fully builds on close collaboration with a diversity of local stakeholders, such as nature/forest owners, private as well as public, farmers, hunters, nature organisations, municipalities, etc. Governance in this issue is complex in the sense that there are many decision makers involved, all with their own authority, domain, concerns and institutional responsibilities. As no actor has full control over decisions or actions of the others, and as the wild boar cross many institutional boundaries when moving through the territory, all of these actors need each other to deal with the issue. Moreover from the perspective of ES, problem perceptions and concerns differ substantially between stakeholders: some focusing only on the disservices of the presence of wild boar (e.g. crop damage and traffic accidents), while others see wild boar as an endemic wildlife species which potentially provide goods and services to society (e.g. hunting, wild meat and wildlife observation). As there are probably no perfect solutions for all concerns, nor can anybody solve the problem on his own, co-management of the wild boar population is necessary.

Several working groups on specific management issues have started recently. In the first phase, collaboration seems quite constructive, despite historical differences points of view and concerns. During the first collective meetings discussions were constructive and most participants stressed the importance of close and constructive collaboration. The first working group meetings also showed collaborative attitudes. One of the main challenges will be to keep building on this constructive collaboration, which fully depends not only on the quality of the approach, but also of the goodwill of the participating organisations.

5. Governance characteristics of Belgian ecosystem services research

The topical focus amongst the different projects/cases is quite diverse. Geographically this diversity is ranging from ES in relation to wildlife management, municipalities, fresh water systems, local area development, a whole region (Flanders), to international trade. The projects/

cases ambitions range from ES inventory, ES assessment, ES valuation, ES mainstreaming, ES prioritization, to ES decision support method development, or combinations of these. One case, the wild boar management project, specifically addresses ecosystem disservices. All projects to some extent aim to provide policy/socially relevant knowledge, processes and/or solutions. Hence, the ambition to be governance relevant clearly is present. The projects/cases do so however to different extents, by different approaches and with different levels of concrete governance practice orientation.

Methodologically the projects/cases differ significantly. An important methodological issue in ES research and practice is valuation: what is the meaning of ES, what is the importance of ES and how is it valued? From a governance perspective the questions "*why do we value, how to value, who values, whose values are important and what is the information basis for valuation*", are crucial. Decisions on these valuation relevant issues have an impact on outputs and uptake/use in practice of the valuation research/exercise. Several cases acknowledge the importance of economic valuation (in the sense of monetarization) for governance, which is currently the dominant focus in international ES research and practice. The rationale behind this is that '*money talks*' (see TEEB). This interpretation of governance relevance is the main focus for one project (Nature Value Explorer), and of significant importance to the soybean case and the ECOFRESH project. Within the ES bundle index, Votes and ECOPLAN projects, monetary valuation is less a central issue: they include also ecological or social valuation perspectives. Two projects regarding ES largely left it open at the start, leaving it to the actors involved in the process: the Wijers project and the wild boar project.

Another aspect of methodological importance is actor inclusion. We differentiate here between types of scientists and other actors coordinating the projects/cases (methodological decision makers) and involvement of other actors in the project (one-way or two/multi-way approaches, top down or bottom up approaches, hybrid approaches). Most projects have a strong scientific orientation: scientists are the main methodological decision makers and main information gatherers and suppliers in these cases. It mainly concerns interdisciplinary teams, involving ecological, economic and/or social scientists in different combinations performing this coordination. Especially in Flemish projects, we recognize often the same groups collaborating in different combinations. The extend to which this is always truly interdisciplinary (real co-creation of new knowledge combining disciplinary perspectives) or mainly multidisciplinary is hard to judge based on the above presented project/case stories.

Furthermore, transdisciplinarity (scientists methodologically co-creating with non-scientists) is an element found in most cases, be it sometimes mainly as a (future) ambition or as part of the methodological decision making process. Actor inclusion concerning methodological decision making is mostly limited to scientists and policy representatives (often the project funders or formal responsible end users). Still, some external methodological input was introduced in some of the projects/cases, to allow user feedback or support, e.g. users of the Nature Value Explorer, end-users in ECOPLAN and participants in the Wijers and the wild boar management projects. Within the Wijers project and the wild boar management project as well as within ECOPLAN, actor involvement from the very start occurred, respectively regarding ES definition, governance and drafting of the research proposal. In other cases, multi-actor participation outside the case coordination was mainly limited to information provision through interviews.

An important governance relevance aspect is the reality check: to what extend is the project/case reality proofed? In general we may label real practical governance relevance still to be a main challenge for ES projects/cases. Still the above described projects/cases show elements which are promising. Apart from good intentions, collaboration between scientist

and policy representatives is noticeable in several projects. Sometimes this developed into close collaboration (e.g. the Nature Value Explorer project) and sometimes this was embedded in real life policy practice (e.g. the Wijers case and the wild boar management project). Apart from policy uptake, uptake by other institutional settings and actors still remains a big challenge. The rather broad interest in e.g. the Nature Value Explorer tool and new projects trying to build on the experience of the Wijers approach (the above mentioned land dune-project is one example), the large numbers of institutions and actors involved in the drafting of ECOPLAN, the co-management approach in the wild boar project, as well as the growing diversity of actors getting involved in the BEES-community are promising evolutions.

Conclusions

We conclude that most of the Belgian ecosystem services research projects presented here have the ambition to be governance relevant and try to incorporate such ambition within their projects. Still, if we look at governance characteristics, we have to conclude that the focus within most projects still is mainly on scientific challenges and only to a lesser extent to governance relevance.

This does not mean that the concept of ecosystem services is not relevant for ecosystem governance. This also does not mean that researchers and policy representatives and others are not willing to work on this. The growing BEES-community and its transdisciplinary nature shows that there is a large potential. But to really live up to this potential, quite some challenges have to be fulfilled. It is important to realize that the ES governance challenge is enormous due to its complexity. A brief survey on policy relevant ES knowledge performed within the BEES-project (Keune and Bauer 2012) is illustrative in this respect, showing the diversity of opinions and concerns about actor inclusion, methodological decision making and the responsibilities of scientists in the face of transdisciplinary collaborative challenges.

Whatever governance strategy is chosen, limitations and imperfections are inherent. Moreover it is important to realize that indeed one chooses an approach, often being the outcome of negotiation amongst the most prominent actors involved. There are different options for framing socio-ecosystem research and governance and the way crucial how-to-do-governance questions are operationalized is open for context dependent discussion. We may conclude here that the consciousness, explicit planning and evaluation of governance aspects throughout ES projects is key to obtain truly socially relevant and sustainable results. We believe this remains an important challenge, to which this paper makes a first contribution.

References

- BEES community, <http://www.beescommunity.be/>
- BEIgium Ecosystem Services (BEES), <http://www.biodiversity.be/bees>
- Constanza et al. (1997), The value of the world's ecosystem services and natural capital. In: *Nature* 387:253-260 (1997)
- Costanza, R. and Folke, C.: 1997, 'Valuing Ecosystem Services with Efficiency, Fairness and Sustainability as Goals', in G. Daily (ed.), *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Island Press, Washington DC, pp. 49–70.
- Cowling R. M., Egoh B., Knight A. T., O'Farrell P. J., Reyers B., Rouget M., Roux D. J., Welz A., and Wilhelm-Rechman A. (2008), An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation, In: *PNAS* - July 15, 2008 - vol. 105 - no. 28 - pg 9483–9488
- Daily, G.C. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington. 392pp.
- de Groot et al. (2002), A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, In: *Ecological Economics* 41 (2002) 393–408
- Ecosystem Services Partnership (ESP), <http://www.fsd.nl/esp>
- Ehrlich, P.R. and A. Ehrlich. 1970. *Population, Resources, Environment: Issues in Human Ecology*. W.H. Freeman, San Francisco. 383pp. - see p.157
- EU Working Group on Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES)
- Hooghe L. and Marks G. (2003), Unravelling the central state, but how? Types of multi-level governance. In: *The American Political Science Review* 97: 233–234.
- Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), <http://www.ipbes.net/>
- Jordan A. (2008), The governance of sustainable development: taking stock and looking forwards, In: *Environment and Planning C: Government and Policy* 26: 17–33.
- Keune H. and Bauler T. (2012), What do you think about the policy relevance of ecosystem service science? Results of a survey amongst the Belgian ecosystem services expert community, Brussels, <http://www.inbo.be/files/bibliotheek/83/233583.pdf>
- Lee M. (2003), *Conceptualizing the New Governance: A New Institution of Social Coordination*, Paper presented at the Institutional Analysis and Development Mini-Conference, May 3rd and 5th, 2003, Workshop in Political Theory and Policy Analysis, Indiana University, Bloomington, Indiana, USA
- Leopold, A. 1949. *A Sand County Almanac and Sketches from Here and There*. Oxford University Press, New York. 226pp.
- Marsh, G.P. 1864 (1965). *Man and Nature*. Charles Scribner, New York. 472pp.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington. 155pp.
- Norgaard R.B. 2010. Ecosystem services: from eye-opening metaphor to complexity blinder. *Ecological Economics* 69(6), 1219-1227.
- Osborn, F. 1948. *Our Plundered Planet*. Little, Brown and Company: Boston. 217pp.

- Our Common Future, Report of the World Commission on Environment and Development, World Commission on Environment and Development, 1987. Published as Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment August 2, 1987
- Study of Critical Environmental Problems (SCEP). 1970. Man's Impact on the Global Environment. MIT Press, Cambridge. 319pp.
- Smith A. and Stirling A. (2010), The politics of social-ecological resilience and sustainable socio-technical transitions. In: Ecology and Society 15(1): 11
- TEEB 2009 'The Economics of Ecosystems and Biodiversity for National and International Policy Makers. Summary: Responding to the Value of Nature'
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) (2010), <http://www.teebweb.org/>
- Vatn A. (2009), An institutional analysis of methods for environmental appraisal. In: Ecological Economics; 68: 2207–2215.
- Vogt, W. 1948. Road to Survival. William Sloan: New York. 335pp.
- Voß J., and Bornemann B. (2011), The politics of reflexive governance: challenges for designing adaptive management and transition management. In: Ecology and Society 16(2): 9
- Wenger E. and Snyder W. M. (2000), Communities of Practice: The Organizational Frontier, In: Harvard Business Review, January-February 2000, pg 139 – 145.
- Wilkinson C. (2011), Social-ecological resilience: Insights and issues for planning theory, In: Planning Theory, May 2012; vol. 11, 2: pp. 148-169

Captage et stockage du carbone : Quel potentiel pour une transition durable ?

Noé LECOCQ

n.lecocq@iew.be

Inter-Environnement Wallonie

L'auteur remercie chaleureusement Marie Cors pour sa relecture et ses conseils précieux.

1. Introduction

En 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement définissait le développement durable de la manière suivante (rapport Brundtland) :

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion :

- *le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et*
- *l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. »*

En d'autres termes, la satisfaction des besoins essentiels de tous, aujourd'hui comme demain, doit être le but premier de l'activité économique, dans un environnement qui rend possible cette satisfaction.

Daly (1990) cite trois principes opérationnels pour préserver un environnement compatible avec le développement durable¹ :

- *Le taux d'utilisation des ressources renouvelables ne doit pas dépasser leur taux de régénération.*
- *Le taux d'utilisation des ressources non renouvelables ne doit pas dépasser le rythme de mise au point de substituts renouvelables.*
- *Le taux d'émission de polluants ne doit pas dépasser le pouvoir d'assimilation du milieu.*

Depuis son origine, le concept de développement durable a donné lieu à des interprétations variées. Aujourd'hui, dans un contexte de crise systémique, à la fois sociale, économique et environnementale, de nombreux acteurs y voient la nécessité d'une transition vers une société différente.

Face à la crise climatique – et à l'objectif de réduire de 80 à 95% nos émissions de CO₂ dans l'atmosphère d'ici 2050 pour maintenir l'augmentation de température globale sous les 2 °C – la technologie du captage et stockage du carbone (CCS²) suscite depuis quelques années un grand intérêt. Bien que sa faisabilité technique et économique ne soit pas encore démontrée à large échelle, le développement de cette technologie est pris – avec plus ou moins

1 Ces principes ont notamment inspiré l'OCDE dans sa définition du transport durable : <http://www.oecd.org/dataoecd/28/56/2397016.pdf>

2 Carbon Capture and Storage. Pour les sigles techniques, nous faisons dans ce document le choix d'utiliser la version anglaise (voir aussi la liste des sigles et acronymes en fin de document).

de prudence – comme hypothèse dans de nombreux scénarios prospectifs (World Energy Outlook, Wallonie Bas Carbone 2050) et feuilles de routes politiques (EU Energy Roadmap 2050).

Le CCS est-il compatible avec le développement durable ? A-t-il un rôle à jouer dans une transition durable, et lequel ? Ce sont les questions que nous aborderons dans cet étude.

Il en résulte un document qui alterne passages « techniques » et passages consacrés à la discussion. Après un tour d’horizon des technologies liées au CCS (chapitre 2), seront discutées les questions de la réduction des émissions de CO₂ (chapitre 3), des risques et responsabilités (chapitre 4), ainsi que de la viabilité économique (chapitre 5). Le chapitre 6 dresse une conclusion à partir des éléments d’analyses développés dans les chapitres précédents.

2. Les technologies du CCS

2.1. Domaines d’application

Le captage et stockage du carbone (CCS) est une chaîne de procédés techniques visant à capter le CO₂ émis par des sources fortement émettrices, et à le transporter vers des sites où il sera ensuite stocké de façon permanente. L’objectif étant de réduire les émissions de CO₂ dans l’atmosphère.

La production d’électricité à partir d’énergie primaire fossile, ainsi que certains secteurs industriels (production de ciment, sidérurgie, pétrochimie, etc.) constituent les principales sources de CO₂ potentiellement visées par le CCS (table 1).

Processus	Nombre de sources	Émissions (MtCO ₂ /an)
Combustibles fossiles		
Énergie	4 942	10 539
Production de ciment	1 175	932
Raffineries	638	798
Industrie sidérurgique	269	646
Industrie pétrochimique	470	379
Traitement du pétrole et du gaz naturel	Non disponible	50
Autres sources	90	33
Biomasse		
Bioéthanol et bioénergie	303	91
Total	7 887	13 468

Table 1 : Grandes sources fixes mondiales de CO₂ qui libèrent plus de 0,1 MtCO₂ par an (GIEC, 2005).

La production d’électricité et la sidérurgie sont les deux types de sources les plus intenses, avec une production moyenne par source de plus de 2 MtCO₂/an. Vu l’importance de ses émissions totales, c’est la production d’électricité qui est prioritairement visée par les programmes de développement du CCS.

Une partie des technologies formant la chaîne CCS est déjà utilisée à l’échelle commerciale, généralement à des fins autres que la lutte contre les changements climatiques. Les projets fonctionnels aujourd’hui concernent surtout le traitement du gaz naturel, dont il est nécessaire de séparer le CO₂ avant commercialisation, et l’enfouissement dans les champs pétroliers ou gaziers, technique qui permet une extraction plus complète des hydrocarbures.

Dans cet article, nous nous focalisons principalement sur le CCS dans le cadre de la

production d'électricité à partir de centrales fossiles, avec stockage géologique du CO₂.

A ce jour, il n'existe pas de centrale électrique de taille commerciale qui fonctionne avec la technologie CCS intégrée. Europe, États-Unis, Canada, Australie, Japon et Chine se sont engagés à mettre sur pied une série de projets de démonstration, même si les difficultés de financement forcent certains états à revoir leurs ambitions à la baisse. En Europe, sur les 12 projets initialement prévus d'ici à 2020, seuls 2 ou 3 pourraient finalement être cofinancés³ par l'UE.

2.2. Captage

Le captage du CO₂ est le premier maillon de la chaîne CCS. Il consiste à extraire le CO₂ de sources où il est présent en grande quantité et en concentration relativement importante. On distingue généralement trois techniques pour extraire le CO₂ des rejets industriels: la postcombustion, la précombustion et l'oxycombustion (figure 1). Aucune de ces trois techniques n'émerge à ce stade comme favorite, chacune présentant certains avantages et certains inconvénients.

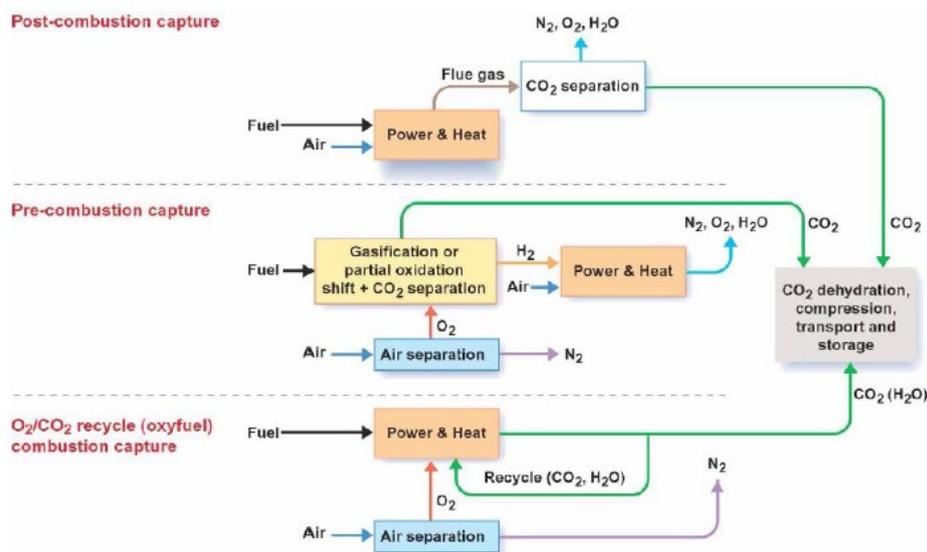


Figure 1 : Représentation schématique des principales possibilités de captage du CO₂ (ZEP, 2006).

2.2.1. Postcombustion

La postcombustion, technique la plus ancienne et la mieux éprouvée, permet de capter le CO₂ présent dans les fumées de combustion qui se dégagent lorsqu'un combustible est brûlé dans l'air.

Les fumées passent dans une colonne de lavage où le CO₂ présent est absorbé sur un solvant chimique (généralement à base d'amines⁴), formant un composé avec celui-ci. Il est ensuite nécessaire de séparer le CO₂ du solvant, en chauffant ce dernier dans une unité de régénération. Cette étape consommatrice d'énergie est à l'origine d'un surplus de 20 à 30 % d'énergie consommée dans les centrales équipées en CCS. Le solvant régénéré peut ensuite être réutilisé.

³ C'est ce qui ressort de la note de travail SWD(2012)224final publiée par la Commission le 12 juillet 2012.

⁴ Le monoéthanolamine (MEA), de formule C₂H₄OHNH₂, est le plus couramment utilisé.

La postcombustion permet typiquement d'extraire 75 à 95 % du CO_2 présent dans les fumées (Piessens et al., 2008). Le flux de CO_2 obtenu est concentré à plus de 99 %, même si de faibles quantités de solvant sont toujours présentes comme impuretés.

Cependant, le solvant devient progressivement inutilisable par oxydation avec l'oxygène résiduel dans les fumées de combustion. Cela implique une consommation d'amines de l'ordre de 1 à 1,5 kg par tonne de CO_2 produit, ainsi que la formation de déchets liquides acides à éliminer (INERIS, 2010a).

La recherche se focalise sur la mise au point de nouveaux absorbants et adsorbants, principalement pour diminuer le surplus de consommation énergétique. Cependant, l'INERIS (2010a) note que « *la course au rendement énergétique risque de se traduire par un recours plus important aux solvants, donc par un degré d'impuretés plus fort du CO_2 obtenu* ».

L'avantage de la postcombustion est qu'elle peut théoriquement être appliquée à de nombreuses centrales et unités industrielles existantes. Ses inconvénients sont sa consommation énergétique, sa consommation de solvant et sa production de déchets.

2.2.2. Précombustion

Le principe de la précombustion est d'extraire le CO_2 du combustible fossile avant la combustion proprement dite. On obtient de l'hydrogène dont la combustion ne dégage pas de CO_2 .

La précombustion est une adaptation de la technologie du cycle combiné à gazéification intégrée (integrated gasification combined cycle - IGCC). Dans une centrale IGCC, un combustible solide tel que du charbon est transformé en gaz de synthèse avant combustion de ce dernier.

La première étape de la précombustion consiste donc à former un gaz de synthèse à partir du combustible fossile (typiquement du charbon ou du méthane). Dans le cas du charbon, cela se fait par oxydation partielle en présence d'oxygène quasi pur. Le gaz de synthèse contient du monoxyde de carbone (CO) et de l'hydrogène (H_2). On fait ensuite réagir ce gaz de synthèse avec de la vapeur d'eau pour obtenir un mélange de dioxyde de carbone (CO_2) et d'hydrogène (H_2).

La séparation du CO_2 se fait par absorption, adsorption, cryogénie ou par membranes.

La précombustion est une technologie récente, principalement applicable sur de nouvelles centrales à construire. Les coûts d'investissement nécessaires sont très élevés et la technologie de cycle combiné à gazéification intégrée n'est pas encore considérée comme mature, ni comme compétitive. En 2008, seules cinq centrales IGCC au charbon de taille commerciale étaient en opération au niveau mondial (Piessens et al., 2008).

2.2.3. Oxycombustion

Si on brûle un combustible fossile dans de l'oxygène pur – procédé d'oxycombustion –, les fumées obtenues présentent une concentration élevée en CO_2 (de 95 à 98%⁵). Cela permet une séparation à moindre coût : par refroidissement et compression la vapeur d'eau présente dans la fumée peut être condensée.

La combustion dans l'oxygène donnant lieu à des températures très élevées, une partie des fumées de combustion est recirculée dans le brûleur pour y limiter la température de

⁵ Pour une combustion classique dans l'air, la concentration en CO_2 dans les fumées est de 3 à 15 %.

combustion.

Comme pour la précombustion, la production d'oxygène est coûteuse et consommatrice d'énergie (jusqu'à 15 % de l'électricité produite par la centrale). Elle se fait dans une unité de séparation de l'air, qui retire l'azote et fournit un flux d'oxygène concentré (INERIS, 2010a).

L'oxycombustion est une technologie expérimentale, en phase de développement.

2.3. Transport

Le transport du CO₂ peut se faire sous plusieurs formes : via pipeline, par bateau ou, dans une moindre mesure, par la route ou le rail.

Pour réduire le volume à transporter, il est nécessaire d'amener le CO₂ à l'état supercritique. Cet état, intermédiaire entre les états liquide et gazeux, est obtenu à une pression supérieure à 7,4 MPa et une température supérieure à 31 °C. À l'état supercritique, le volume est proche du volume à l'état liquide, tandis que la viscosité reste faible, proche de celle à l'état gazeux. Une faible viscosité facilite l'écoulement dans un pipeline.

Il est également nécessaire d'éliminer la vapeur d'eau éventuellement présente avec le CO₂ car le CO₂ humide est corrosif pour les aciers qui constituent les pipelines.

Les risques associés au transport de CO₂ sont modérés. Ils ne sont pas plus importants que ceux associés au transport de gaz naturel. La différence tient au fait que le CO₂ n'est pas inflammable en cas de fuite, mais peut causer des asphyxies pour les hommes et les animaux (effet mortel sur l'homme à partir de 10 % de concentration en volume dans l'air) (INERIS, 2010a).

Le transport par pipeline est économiquement préférable pour déplacer de gros volumes de CO₂ sur des distances modérées, le bateau étant plus intéressant pour de petits volumes à transporter sur de longues distances.

Bien que le captage soit généralement cité comme le maillon le plus coûteux de la chaîne CCS à l'échelle d'un projet, la mise en place d'une infrastructure de transport de CO₂ efficace, sous la forme d'un réseau de pipeline intégrant différents sites de captage et de stockage, ne peut se faire sans investissements préalables extrêmement importants.

Le déploiement éventuel de telles infrastructures de transport dans des zones densément peuplées, comme en Europe occidentale, n'ira pas sans soulever des questions d'ordre divers : sécurité, disponibilité du sol, aspects paysagers, etc.

2.4. Stockage

2.4.1. Options de stockage et durée

Les éléments critiques du stockage sont la sécurité et la permanence à long terme du piégeage. Les risques potentiels sont à la fois nombreux et mal évalués, à cause du faible retour d'expérience. Le Centre d'analyse stratégique (CAS 2012) indique qu'« *une période de stockage de plusieurs siècles est nécessaire si l'on veut lutter efficacement contre le réchauffement climatique* ».

Le stockage du CO₂ peut prendre plusieurs formes :

1. Stockage géologique, où le CO₂ est piégé dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, des aquifères salins profonds, des veines de charbon inexploitées ou d'autres roches.
2. Stockage océanique, où le CO₂ est envoyé à grande profondeur dans l'océan

pour se dissoudre dans l'eau ou former un « lac » de CO₂ liquide sur le fond océanique.

3. Stockage dans les écosystèmes, par la croissance de la végétation.

Il faut aussi noter que le CO₂ capté peut être utilisé dans certains processus industriels. En 2008, 100 Mt CO₂ ont servi d'intrant à l'industrie chimique (production d'urée, de méthanol, etc.), et 13,5 Mt CO₂ pour la production de réfrigérants, solvants, gazéifiants des boissons, etc. (CAS, 2012) La durée de ces formes de « stockage » varie en fonction de l'application.

Dans cet article, nous nous intéresserons principalement au stockage géologique (table 2 et figure 3). La possibilité de stockage océanique doit être écartée pour des raisons d'impact environnemental important (acidification des océans néfaste à la vie sous-marine (GIEC, 2005)), de rétention du CO₂ trop partielle, et de non traçabilité de la responsabilité. Le stockage dans les écosystèmes est un processus important, mais qui concerne plus le CO₂ déjà présent sous forme diluée dans l'atmosphère que celui capté en flux concentrés dans des sources industrielles.

Type de réservoir	Estimation inférieure de la capacité de stockage (GtCO ₂)	Estimation supérieure de la capacité de stockage (GtCO ₂)
Gisements de pétrole et de gaz naturel	675 ^a	900 ^a
Veines de charbon inexploitable (RAMCH)	3-15	200
Formations salines profondes	1 000	Incertain, mais peut-être 10 ⁴

^a Ces chiffres seraient majorés de 25 % si les gisements «non découverts» étaient inclus dans l'évaluation.

Table 2 : Capacité mondiale de stockage dans diverses formations géologiques, y compris les options qui ne sont pas économiquement rentables (GIEC, 2005).

Le stockage géologique du CO₂ peut en principe s'étendre sur des durées extrêmement longues, de milliers voire de millions d'années.

On distingue dès lors plusieurs phases dans le cycle de vie d'un site de stockage géologique (figure 2). La période d'exploitation (conception, construction, injection et fermeture) est celle dont la durée est la plus courte, de l'ordre d'une cinquantaine d'années.

La période de mémoire, pendant laquelle la société conserve une mémoire du stockage et des risques associés, en assurant une surveillance active ou allégée du site. Selon INERIS (2010a), « sa durée est incertaine, mais on estime qu'elle ne saurait dépasser 300 ans ».

La période d'oubli (long terme) est la plus longue et couvre des centaines, voire des milliers d'années. L'existence même du stockage et des risques associés aura été oubliée.

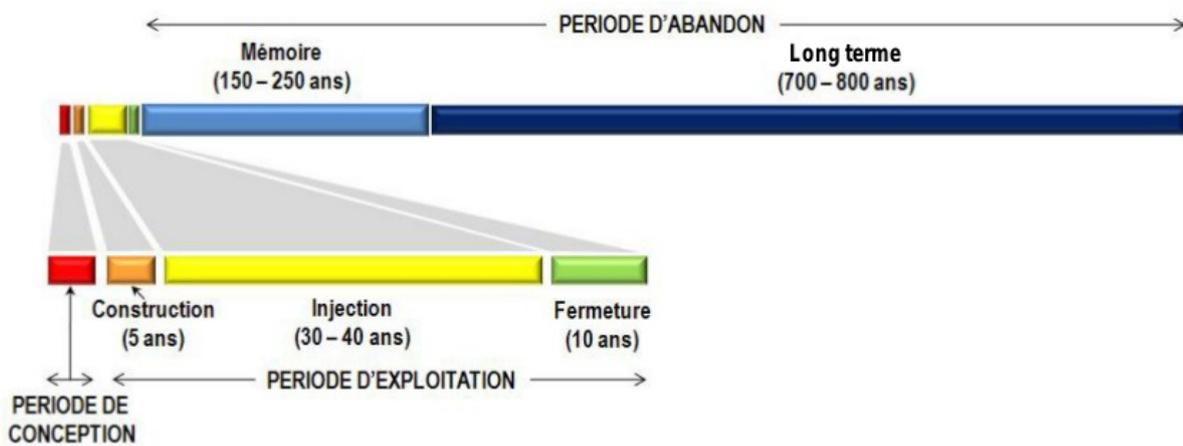


Figure 2 : Les différentes phases de vie d'un site de stockage géologique (durées indicatives) (INERIS, 2010a).

2.4.2. Gisements d'hydrocarbures épuisés (DOGF)

Depuis une quarantaine d'années, l'industrie pétrolière utilise la technique de récupération assistée d'hydrocarbures par injection de CO₂. Ce procédé permet d'extraire plus complètement le pétrole ou le gaz présents dans les gisements, par augmentation de la pression dans ceux-ci. On distingue la récupération assistée de pétrole (EOR – Enhanced Oil Recovery) et la récupération assistée de gaz (EGR – Enhanced Gas Recovery).

Dans ces cas, l'objectif n'est pas de stocker le CO₂, mais de récupérer les hydrocarbures, même si environ 60 % du CO₂ injecté est retenu ensuite dans le réservoir (INERIS, 2010a).

Il faut noter que lorsqu'une injection de CO₂ permet d'extraire une quantité de pétrole qui aurait été inaccessible autrement, l'opération se solde généralement par un surplus d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère. En effet, malgré le piégeage d'une partie importante du CO₂ injecté dans la nappe de pétrole, la combustion du pétrole extrait mènera inévitablement à des émissions supplémentaires⁶, auxquelles il faut encore ajouter les émissions liées aux processus d'injection-extraction, au transport, au raffinage, etc.

Dans le cadre du CCS, les techniques EOR et EGR sont mises en avant comme montrant la faisabilité d'utiliser les gisements d'hydrocarbures épuisés pour stocker le CO₂. Cependant, il n'existe encore aucun projet de stockage en gisement d'hydrocarbures épuisé qui ne soit pas EOR ou EGR.

Les gisements utilisables doivent se trouver à une profondeur d'au moins 800 m pour que le CO₂ soit à l'état supercritique.

2.4.3. Aquifères salins profonds (SA)

Un aquifère est une formation géologique poreuse et perméable qui contient de l'eau. Les plus superficiels contiennent de l'eau douce (nappes phréatiques) et sont fréquemment utilisés pour les besoins humains. Les plus profonds, dont il sera question ici, contiennent de l'eau salée (saumure).

⁶ A titre d'exemple, le site de Weyburn au Canada utilise l'EOR avec un rendement de 0,97 kg de pétrole pour 1 kg de CO₂ injecté (Greenpeace, 2008). Or, il y a environ 0,85 kg de carbone dans un kilogramme de pétrole, ce qui, en cas de combustion complète, libère 3,12 kg de CO₂ (0,85 x 44 / 12). Chaque kilogramme de CO₂ injecté à Weyburn provoque donc l'émission d'environ 3,02 kg de CO₂.

En aquifère salin profond, les mécanismes de piégeage du CO₂ sont les suivants (INERIS, 2010a, 2010b) :

- Au point d'injection, le CO₂ supercritique forme une bulle moins dense que l'eau qui est retenue par les roches supérieures, c'est le piégeage hydrodynamique ;
- Très progressivement, le CO₂ se dissout dans l'eau de l'aquifère autour de la bulle supercritique, c'est le piégeage en phase aqueuse. Des simulations montrent que la dissolution du CO₂ dans la saumure commence à être significative après 2000 ans. L'eau ainsi enrichie en CO₂ est plus dense ; elle finira par couler à la base de la formation.
- Finalement, le CO₂ peut réagir avec l'eau et les roches présentes et former des composés minéraux solides, appelés carbonates. Ce processus très lent s'étend sur des dizaines de milliers d'années, c'est le piégeage en phase minérale.

Selon INERIS, « l'introduction massive de CO₂ dans des aquifères profonds fortement minéralisés induira une perturbation des équilibres chimiques et des propriétés thermodynamiques du système CO₂-H₂O-NaCl qui est à la base de leur fonctionnement hydrogéochimique. »

Au niveau mondial, il n'existe actuellement qu'un seul site de stockage du CO₂ en aquifère salin profond, le site norvégien de Sleipner en Mer du Nord. Le CO₂ injecté dans l'aquifère est obtenu par traitement du gaz naturel issu d'un gisement proche. Il est en effet courant que le gaz naturel contienne du CO₂ dont il doit être débarrassé avant commercialisation.

L'utilisation d'aquifères salins profonds pour stocker le CO₂ peut entrer en conflit avec d'autres utilisations, telle que la production d'énergie par géothermie ou l'exploitation de la saumure (Christensen et al., 2004).

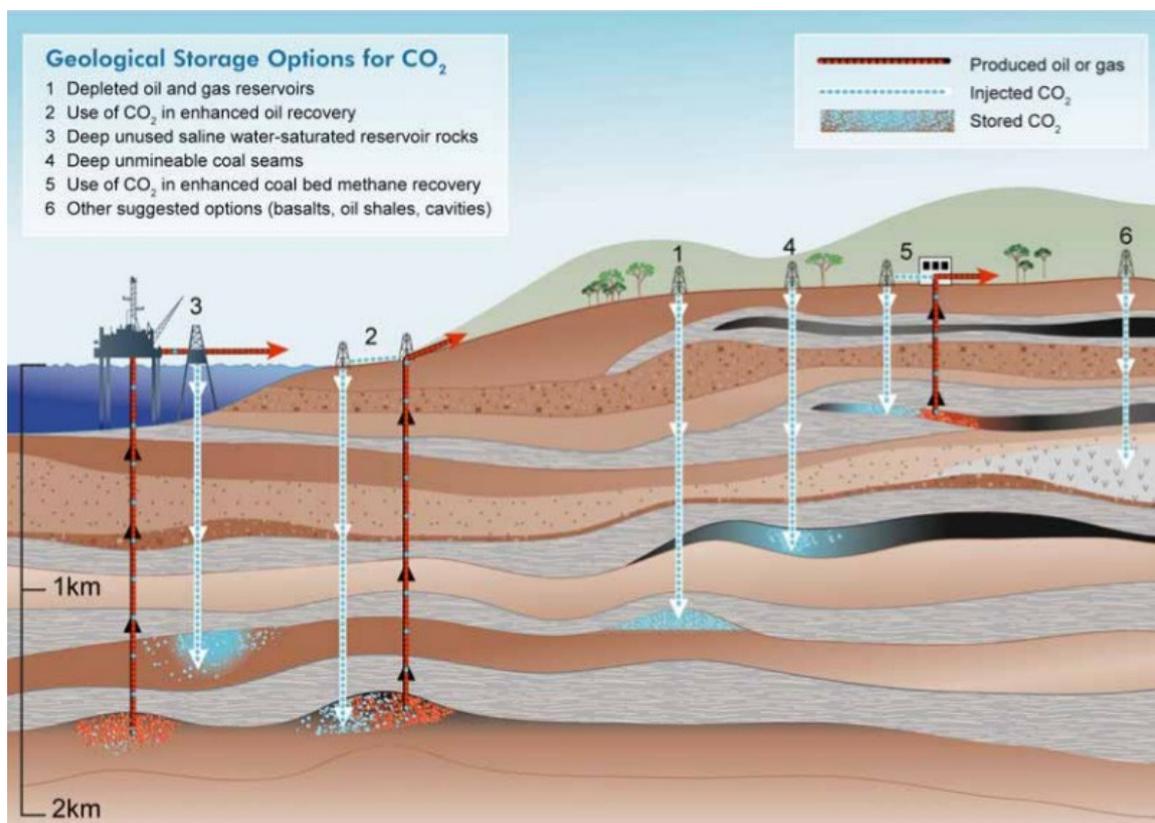


Figure 3 : Les options de stockage géologique du CO₂ (Cook, 1999).

2.4.4. Gisements de charbon

Le charbon est un milieu fortement microporeux ; sa très grande surface spécifique interne lui permet de fixer efficacement le CO₂ par adsorption. Une tonne de charbon peut emmagasiner jusqu'à 40 à 60 m³ de CO₂ par ce mécanisme (INERIS, 2010a). Le risque de fuite est faible, car la liaison chimique est forte. Cependant, si le charbon est brûlé, le CO₂ fixé est libéré.

Le CO₂ peut également être emmagasiné comme gaz dans les micropores, mais ce mécanisme présente un potentiel de stockage environ 10 fois plus faible et n'est pas aussi stable que l'adsorption.

Les gisements de charbon, bien que présentant un potentiel modéré pour le CCS à l'échelle globale (voir table 2), suscitent un intérêt croissant dans certaines régions d'Europe. Certaines industries émettrices de CO₂ (sidérurgie, centrales thermiques) se trouvent en effet à proximité directe d'anciens sites houillers.

De plus, l'adsorption du CO₂ sur le charbon permet de désorber le méthane naturellement présent dans le charbon en s'y substituant⁷. Il s'agit de la technique de récupération assistée du méthane dans les veines de charbon (ECBMR – Enhanced Coal Bed Methane Recovery).

Le site de San Juan aux États-Unis, caractérisé par une perméabilité très élevée de la veine de charbon, est actuellement le seul cas d'exploitation industrielle de cette technique. En Europe, les gisements de charbon pourraient nécessiter une étape de fracturation artificielle pour augmenter la perméabilité préalablement à une éventuelle exploitation de type ECBMR (INERIS, 2010a).

2.4.5. Potentiel de stockage belge

En Belgique, le projet PSS-CCS (Piessens et al., 2008) a étudié plusieurs sites de stockage potentiels. En Flandre, parmi les quatre réseaux aquifères envisagés, seule la formation de Bundsandstein présente un potentiel de stockage appréciable associé à une bonne porosité, mais sa perméabilité est modérée.

En Wallonie, l'aquifère dinantien (aquifère des calcaires carbonifères) est mentionné, avec une capacité de 180 à 270 MtCO₂ dans sa partie belge la plus profonde. Son utilisation potentielle pour le CCS entrerait néanmoins en conflit avec une autre utilisation possible : la production d'énergie géothermique.

Les gisements houillers wallons sont caractérisés par une assez faible concentration en charbon et des veines étroites (>1m en moyenne). Ils ne sont pas adaptés à l'injection en veine simple. L'étude PCC-CSS envisage la perspective d'une injection en veine multiples, avec stockage du CO₂ non seulement dans le charbon, mais plus encore dans le grès adjacent. Avec ces hypothèses, le potentiel de stockage est évalué à 700 MtCO₂ à des profondeurs de 700 à 1300 m dans les gisements non exploités. Les gisements anciennement exploités posent quand à eux des difficultés au niveau de l'étanchéité et de la permanence du stockage.

Le projet européen GESTCO (Christensen et al., 2004), avait pour sa part identifié en Belgique un potentiel de 100 MtCO₂ dans les aquifères de Campine et de 432 MtCO₂ en association avec la technique ECBMR.

Pour donner un ordre de grandeur, les émissions belges de CO₂ sont d'approximativement 100 MtCO₂ par an.

⁷ Le CO₂ se lie plus fortement au charbon que le méthane. Le charbon fixe par adsorption entre deux et cinq fois plus de moles de CO₂ que de méthane.

2.5. Bioénergie et CCS

Si une centrale électrique équipée en CCS est alimentée par de la biomasse, le CO₂ capté dans l'atmosphère par les végétaux pendant leur croissance pourrait être stocké géologiquement. Cette possibilité, encore théorique actuellement, suscite certains espoirs.

Le GIEC (2011) estime que la bioénergie combinée au CCS pourrait mener à des émissions négatives, c'est-à-dire à un retrait de CO₂ de l'atmosphère. Ce qui fait dire à Levina (2012) que « *la bioénergie associée au captage et stockage du carbone pourrait devenir l'aspirateur à CO₂ de demain* ».

Pourtant, dans son World Energy Outlook, l'AIE (2011) est prudente, estimant que « *cette technologie n'est pas prouvée à une échelle commerciale, il n'est donc pas possible de compter dessus* ».

Au-delà des aspects technico-économiques, le précédent des agrocarburants devrait inciter à la plus grande prudence lorsqu'il s'agit d'exploiter la bioénergie à grande échelle. Il n'existe en effet à ce jour aucun consensus politique sur la manière de comptabiliser les émissions de CO₂ liées à la bioénergie. Dans le cas des agrocarburants, des facteurs importants ne sont pas pris en compte dans les politiques de promotion mises en œuvre. Cela aboutit à des économies de CO₂ virtuelles, soutenues financièrement par les pouvoirs publics, alors que de nombreuses études (IEEP 2010, AEE 2011) ont montré que le résultat réel est une augmentation des émissions de CO₂.

Parmi les facteurs non pris en compte, mentionnons les changements indirects dans l'affectation des sols (ILUC – Indirect Land Use Change), que l'on peut définir de la manière suivante : *Si un sol est affecté à une nouvelle culture énergétique, sa fonction antérieure (production alimentaire, habitat, etc.) n'est plus assurée. Dans de très nombreux cas, cela mène à un changement d'affectation pour des terres situées ailleurs, afin remplacer la fonction antérieure.*

Un second facteur d'erreur, mis en évidence par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE 2011) notamment, correspond au fait que si la biomasse n'avait pas été cultivée, coupée et brûlée pour produire de la bioénergie, la végétation aurait tout de même grandi sur ce sol avant de se décomposer, jouant ainsi son rôle de puits de carbone. Cette diminution de séquestration du carbone doit être quantifiée correctement et ensuite prise en compte dans les politiques d'utilisation de la bioénergie.

Par ailleurs, les impacts négatifs d'une exploitation croissante de la biomasse dépassent largement la question du carbone. Il s'agit d'impacts directs ou indirects, environnementaux ou sociaux, qui se produisent aux différentes étapes du cycle de vie des filières bioénergie : déforestation, perte de biodiversité (monocultures), consommation et pollution de l'eau et des sols, pression foncière et accaparement de terres, accroissement de la volatilité des marchés agricoles et alimentaires, marginalisation et paupérisation de la petite paysannerie à l'échelle mondiale, etc.

L'Académie des Sciences allemande a récemment publié un rapport détaillé sur la bioénergie (Leopoldina, 2012) où elle considère que de nombreux scénarios d'utilisation de la bioénergie pèchent par optimisme. Elle qualifie d'« *irréalistes* » les chiffres avancés dans le rapport SRREN (GIEC, 2011) qui suggèrent que la combinaison bioénergie et CCS pourrait offrir une voie de salut. En Europe, en particulier, la biomasse est déjà souvent exploitée de manière excessive, ce qui empêche un maintien correct de la fertilité des sols. Le potentiel d'utilisation durable de la biomasse à des fins énergétiques étant relativement limité, l'Académie des Sciences recommande de se focaliser plutôt sur des énergies renouvelables telles que la

chaleur solaire, le photovoltaïque et l'énergie éolienne, ainsi que sur les économies d'énergie.

Tout comme pour les centrales au gaz ou au charbon, l'application du CCS à une centrale à biomasse implique une augmentation sensible de la consommation de combustible pour produire une quantité fixe d'électricité, d'où une pression encore accrue sur la ressource biomasse.

3. Potentiel de réduction des émissions de CO₂

Le GIEC (2005) estime que les technologies disponibles devraient permettre de capter 85 à 95 % du CO₂ émis par les centrales équipées en CCS. Vu la surconsommation énergétique de celles-ci, la réduction nette d'émissions de CO₂ par rapport à une centrale non équipée est plus faible, de l'ordre de 80 à 90 % (figure 4).

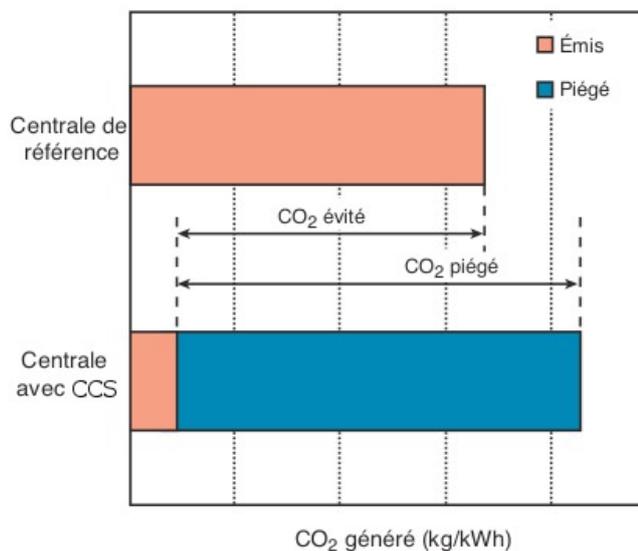
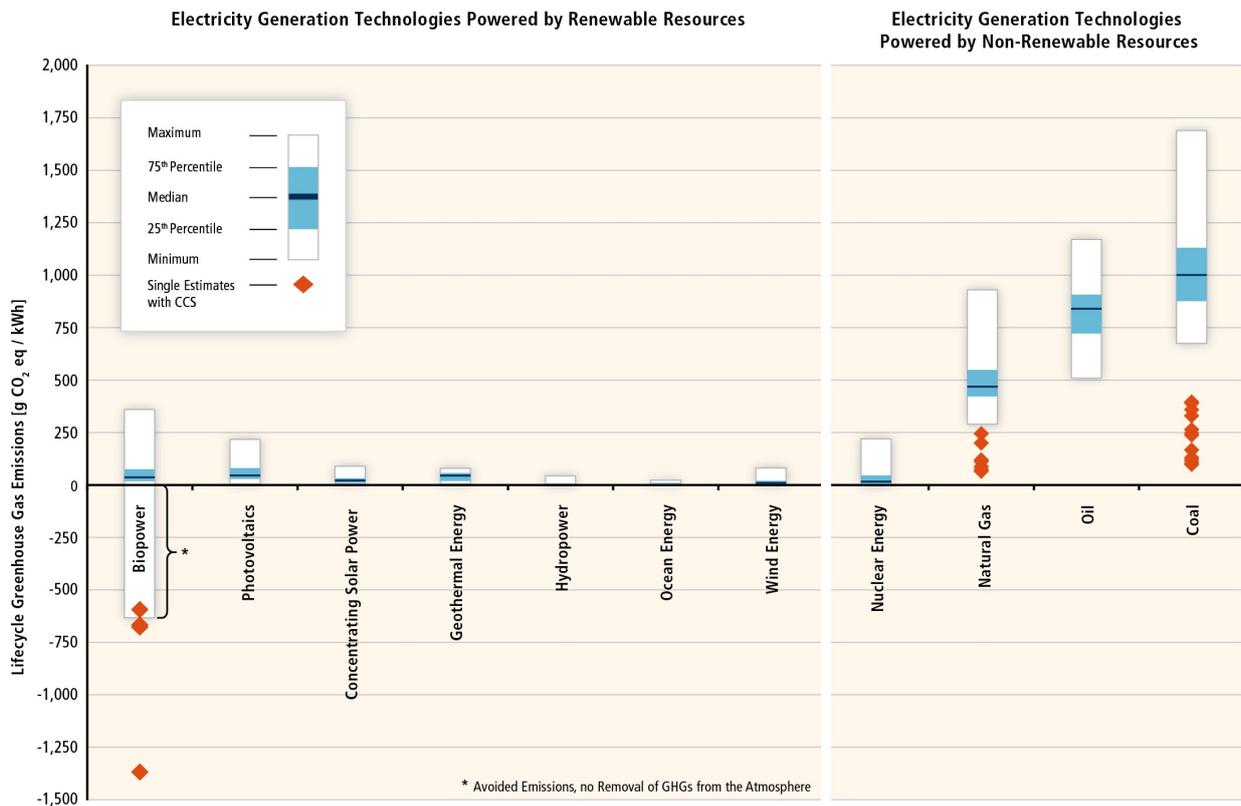


Figure 4 : Il ne faut pas confondre CO₂ piégé et CO₂ évité. Au final, une centrale équipée avec un système CCS totalement fonctionnel devrait émettre dans l'atmosphère environ 10 à 20 % du CO₂ émis par une centrale classique (GIEC 2005).

Si l'on compare les émissions de différentes filières de production d'électricité décarbonée, on constate que les centrales fossiles équipées en CCS devraient continuer à émettre sensiblement plus de gaz à effet de serre par unité d'énergie produite que la plupart des filières renouvelables (figure 5).



Count of Estimates	222(+4)	124	42	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
Count of References	52(+0)	26	13	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

Figure 5 : Estimations des émissions de CO_2 pour différents moyens de production de l'électricité (GIEC, 2011). Les changements dans l'affectation des sols ne sont pas pris en compte dans ces chiffres, ce qui donne des valeurs biaisées en faveur de la biomasse (et dans une moindre mesure de l'hydroélectricité). Les chiffres présentés pour la biomasse ont été critiqués par l'Académie des Sciences allemande (Leopoldina, 2012) qui les considère comme excessivement « optimistes » et « irréalistes » (voir section 2.5).

Il importe de replacer ces niveaux d'émission dans leur contexte. Pour avoir 50 % de chances de rester sous les 2°C d'augmentation moyenne des températures, les émissions de CO_2 cumulées entre 2010 et 2050 ne doivent pas dépasser 1176 Gt CO_2 (321 GtC). Pour avoir 75 % de chances, il faut émettre moins de 736 Gt CO_2 (200 GtC) (Meinshausen et al., 2009). La figure 6 reprend des chiffres du GIEC qui vont dans le même sens.

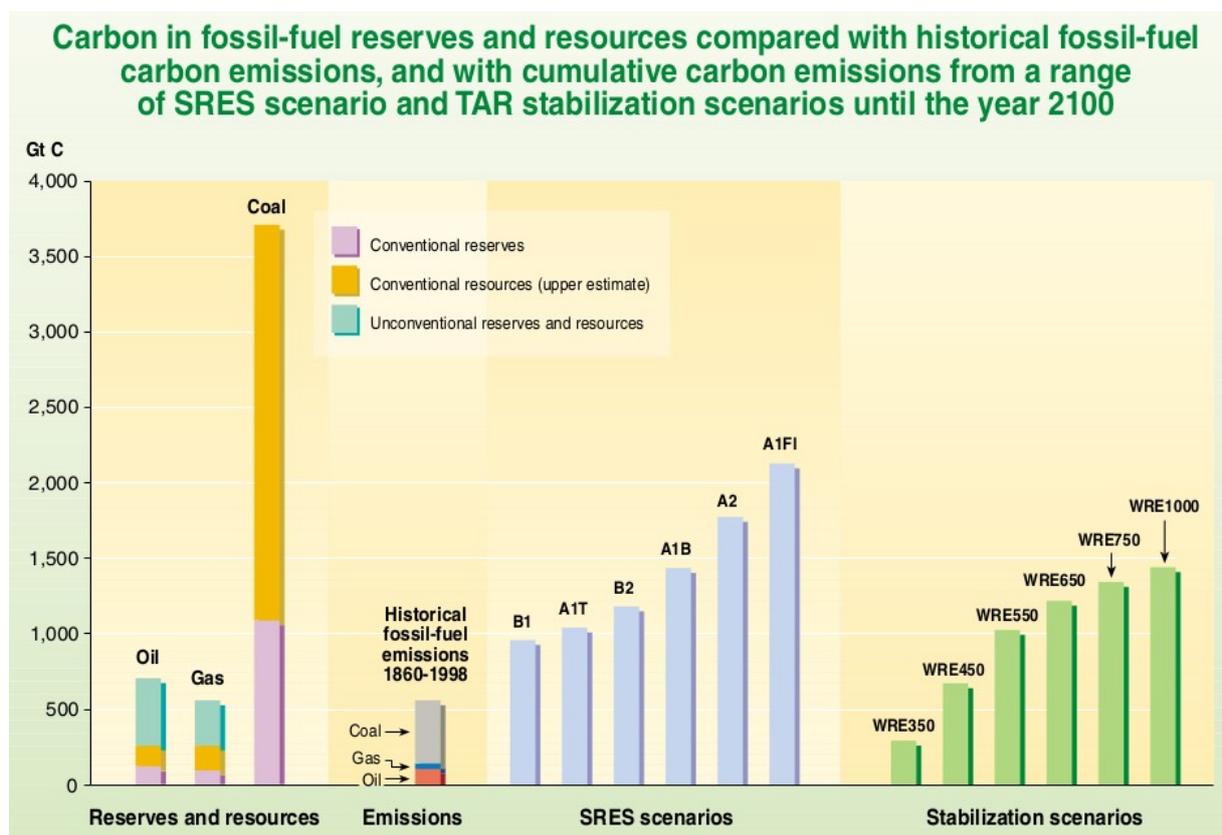


Figure 6 : La quantité de carbone contenue dans les réserves fossiles (trois barres de gauche) dépasse très largement ce qu'il est possible d'émettre de manière compatible avec un scénario de stabilisation à 450 ppm du CO₂ dans l'atmosphère (scénario WRE450, à droite). Ce scénario implique de limiter les émissions cumulées entre 2001 et 2100 à des valeurs comprises entre 365 et 735 GtC (valeur supérieure représentée ici) (GIEC 2001).

Face à ces chiffres, l'AIE (WOE 2011) estime que « moins de la moitié des réserves fossiles prouvées⁸ restantes peuvent être utilisées au cours des 40 prochaines années. Une plus grande quantité de ces réserves pourrait être utilisée sans dépasser le budget CO₂ si le CCS devient disponible. Cependant, la technologie CCS n'a pas encore été prouvée à l'échelle commerciale et le niveau d'engagement derrière les centrales de démonstration suscite des doutes sur la rapidité avec laquelle elle pourrait l'être ». L'agence souligne également que 80 % des émissions permises d'ici à 2035 sont déjà « cadencées » par l'infrastructure existante (centrales, bâtiments, industrie), ce qui laisse très peu de marge de manœuvre.

Notons également que la production d'électricité est une application des énergies fossiles pour laquelle il existe des alternatives renouvelables qui peuvent être déployées de manière importante. C'est beaucoup moins le cas des applications liées au transport (automobile, transport routier, aviation, etc.), où le pétrole est difficilement substituable. Ces applications mobiles, incompatible avec le CCS, seront probablement celles qui continueront le plus longtemps à brûler des énergies fossiles, imposant de ce fait aux autres secteurs d'atteindre rapidement des niveaux d'émissions proches de zéro.

Le niveau de réduction des émissions dans les centrales CCS, pour autant qu'il soit confirmé en conditions réelles, risque fort de s'avérer rapidement insuffisant. Il ne sera pas

8 Les réserves prouvées sont celles dont on est le plus sûr. Les réserves probables et les réserves possibles recouvrent des quantités plus importantes, mais dont la possibilité d'utilisation est moins certaine.

possible de continuer à utiliser les énergies fossiles à long terme, même si les centrales équipées en CCS n'émettent que 10 à 20 % du CO₂ émis par une centrale classique. En effet, ces émissions, ajoutées aux émissions prévisibles des autres secteurs émetteurs, resteraient supérieures aux niveaux compatibles avec une stabilisation du climat.

A cela s'ajoutent les incertitudes sur la permanence du stockage (voir chapitre 4). Il a été montré (Greenpeace, 2008) que des taux de fuite faibles, de l'ordre de 1 % par an, peuvent annihiler les bénéfices climatiques du CCS.

Si les incertitudes pesant sur la permanence du stockage étaient levées, la technologie CCS appliquée aux centrales fossiles pourrait éventuellement devenir une technologie « de transition » vers une électricité réellement décarbonée. Cependant, sa durée de pertinence serait vraisemblablement assez limitée. A partir du moment où les filières renouvelables aux émissions de CO₂ quasi-nulles deviennent abordables, celui-ci perd beaucoup de sa raison d'être.

4. Risques et responsabilité

4.1. Gestion des risques

La notion de risque possède deux dimensions indissociables :

1. la probabilité d'occurrence d'un événement ;
2. la sévérité des conséquences de sa réalisation.

Analyser les risques, c'est donc répondre aux questions suivantes (INERIS, 2010a) :

1. Qu'est-ce qui peut mal tourner ?
2. Quelle est la probabilité que cela se produise ?
3. Si cela se produit, quelles en seront les conséquences ?
4. Quelle confiance peut-on accorder aux réponses données à ces questions ?

Dans certains cas, il est extrêmement difficile, voire impossible, de répondre de manière complète et précise à ces questions. S'il faut garder en tête son caractère forcément lacunaire, l'analyse de risques permet néanmoins d'identifier certains scénarios à éviter, ainsi que les lacunes de nos connaissances.

Il en va ainsi pour le CCS : l'expérience en la matière est balbutiante⁹. On ne dispose pas des éléments de recul nécessaires à une analyse fine du risque. Tout au plus peut-on s'inspirer de l'expérience existante sur des activités similaires (paragraphe 4.2) pour imaginer les scénarios problématiques (paragraphe 4.3).

En conclusion de sa volumineuse recherche, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS 2011) indique clairement la nécessité combler certaines lacunes dans nos connaissances, parmi d'autres mesures d'anticipation des risques :

« Sans préjuger de l'intérêt d'un recours au stockage souterrain de CO₂ par rapport à d'autres dispositions de lutte contre l'effet de serre, la mise en exergue de risques potentiels liés à une fuite de CO₂ permet de faire les préconisations suivantes :

• Afin de disposer d'un retour d'expérience au niveau international, il convient de capitaliser les informations et données relatives aux incidents rencontrés par les opérateurs, en incluant notamment les insuffisances des dispositifs de surveillance ou des modélisations numériques, et ce dès les sites démonstrateurs.

⁹ A Sleipner, un des plus anciens sites de stockage artificiel, le stockage a débuté en 1996.

• *Il apparaît nécessaire de préciser les critères de choix des sites de stockage. La structure géologique et les conditions tectoniques, les propriétés mécaniques et géochimiques du réservoir, la forme et l'épaisseur de la roche-couverture ainsi que sa perméabilité et son hétérogénéité sont autant de paramètres essentiels pour assurer la sécurité de l'homme et de l'environnement*

• *Il semble pertinent de prévoir, dès le stade de la conception, des mesures de maîtrise du risque (barrières de sécurité) répondant en priorité à deux fonctions de sécurité : limiter les perturbations mécaniques, hydrauliques et chimiques d'une part et assurer le confinement des fluides d'autre part. »*

Mettre en place un outil international de rapportage est une proposition qui mérite d'être entendue. Cet outil pourrait s'appliquer au stockage géologique de CO₂, dans l'hypothèse où il est mis en œuvre, mais aussi à d'autres activités proches pour lesquelles une base de donnée détaillée d'accidentologie serait pertinente, comme l'extraction et l'exploitation des ressources fossiles.

4.2. Analogues et accidentologie

Vu la quasi-absence de retour d'expérience en matière de CCS, il est nécessaire d'étudier les enseignements d'activités proches. Il en va ainsi du transport et du stockage d'hydrocarbures et de gaz naturel dans des formations géologiques, des techniques EOR, EGR et ECBMR, du forage onshore et offshore, de réservoirs géologiques naturels de CO₂, du stockage géologique de déchets radioactifs, etc.

Dans l'attente d'une base de donnée universelle et consolidée, il existe des recensements partiels. Citons quelques événements répertoriés pour des activités proches de certaines étapes du CCS :

Fuite de gazoducs et pipelines

• Le 30 juillet 2004, explosion meurtrière d'une conduite de gaz à Ghislenghien, en Belgique.

• Wikipédia (2012) répertorie 105 accidents (ruptures, fuites, explosions, etc.) sur des pipelines aux États-Unis entre 2000 et 2010.

Fuite sur puits de forage offshore

• Le 20 avril 2010, explosion sur la plate-forme Deepwater Horizon exploitée par BP dans le Golfe du Mexique. La plate-forme coule deux jours plus tard et le pétrole s'échappe de la nappe par 1500 m de fond. Après plusieurs tentatives infructueuses, la fuite est finalement colmatée trois mois plus tard. On estime à plus de 4 millions de barils la quantité de pétrole libérée.

• Le 25 mars 2012, une importante fuite de gaz survient sur la plate-forme Elgin-Franklin exploitée par Total en Mer du Nord. La fuite est colmatée le 16 mai 2012. On estime à plus de 4 millions de mètres cubes la quantité de gaz (méthane principalement) qui s'est échappée dans l'atmosphère.

Échappement de gaz stocké dans des réservoirs géologiques (INERIS, 2010a)

• En 2001, du gaz provenant d'un stockage souterrain en site naturel est remonté le long d'anfractuosités dans le sol et a provoqué des éruptions de geysers à Hutchinson aux USA. En France, une éruption de puits de gaz s'est produite en 1989 à Chémery.

• L'IEA a recensé 9 incidents avant 1970 et 8 sur la période 1980-2004 dans des réservoirs

géologiques où l'on a stocké du gaz naturel.

Libération spontanée de gaz d'un réservoir naturel

- Le 21 août 1986, libération subite de 240 000 tonnes de CO₂ d'origine profonde dans le lac Nyos, au Cameroun. Les fortes concentrations de CO₂ dans l'air causèrent la mort par asphyxie de 1700 personnes et de dizaines de milliers d'animaux.

Mouvements géologiques suite à l'extraction ou l'injection de fluides dans le sol

- Sur le site de Salah, en Algérie, une élévation de la surface du sol suite à l'injection de CO₂ a été mise en évidence en 2009 (INERIS, 2010b).

- Sur son site d'information publique¹⁰, le Lawrence Berkeley National Laboratory indique que « *au cours de la dernière décennie, on a observé un certain nombre de cas de sismicité induite par l'exploitation du pétrole et du gaz naturel, ainsi que par l'injection de liquides à haute pression* ».

Le stockage géologique de déchets radioactifs est un domaine pour lequel le retour d'expérience est faible, mais les études nombreuses. Abou Akar et al. (2005) considèrent que « *les méthodes d'évaluation des risques pour les stockages de déchets radioactifs sont les plus pertinentes et disponibles pour l'évaluation des risques du stockage de CO₂* ».

Au-delà des similitudes mises en évidence au paragraphe 4.2, l'INERIS (2010a) montre que le CCS présente certaines caractéristiques propres qui ne se retrouvent pas dans d'autres activités, comme notamment :

- la nature du fluide :

- le CO₂ n'est pas inflammable, mais peut causer la mort par asphyxie à forte concentration dans l'air¹¹;

- le CO₂ est soluble dans l'eau et conduit à une acidification de celle-ci ;

- il peut s'avérer corrosif vis-à-vis des tubages en aciers, des ciments classiques et des roches souterraines (ce qui, outre le risque de fuite, peut l'amener à remobiliser des micropolluants minéraux ou organiques) ;

- le CO₂ en provenance d'unités industrielles est chargé en impuretés telles que SO_x, NO_x, H₂S, Ar, N₂, O₂, H₂O, solvants, etc.

- le stockage est envisagé pour des périodes de très longue durée ;

- si le CCS se développe, il y aura, à terme, plusieurs milliers de sites de stockage géologique répartis dans un nombre important de pays sur toute la planète (contrairement à l'éventuel stockage géologique de déchets radioactifs) ;

¹⁰ http://esd.lbl.gov/research/projects/induced_seismicity/oil&gas/

¹¹ Étant plus lourd que l'air, le CO₂ est susceptible de s'accumuler au-dessus du sol lors d'une fuite.

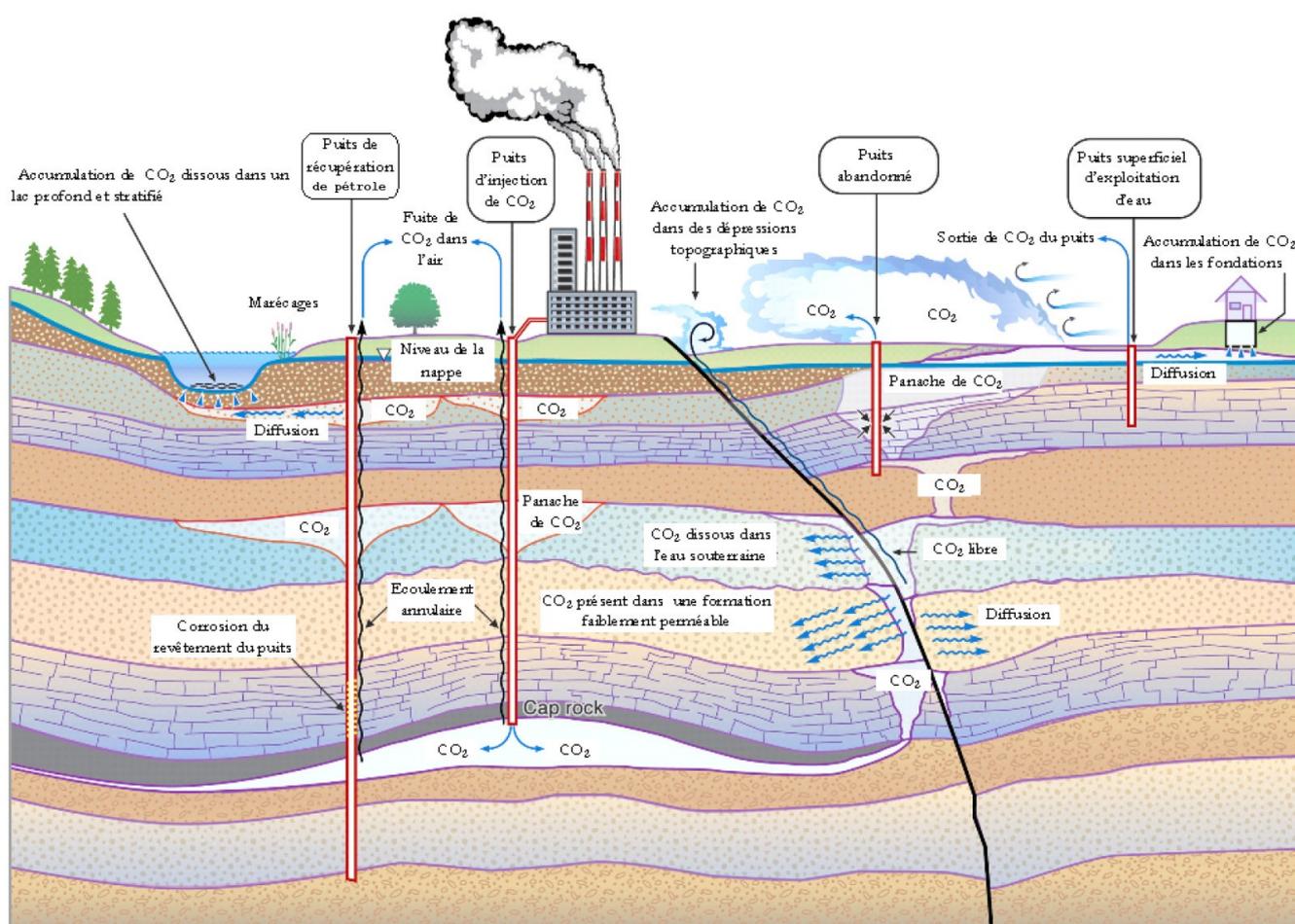


Figure 7 : Identification de scénarios possibles de fuite du CO₂ piégé (Hovorka et al., 2006). Le scénario de fuite le long d'un puits après son abandon et son colmatage est jugé « fort probable » par l'INERIS (2011) à cause des propriétés corrosives du CO₂ dissous sur l'acier et le ciment.

Les principaux risques identifiés par INERIS (2010a, 2011) en matière de stockage du CO₂ sont :

- fuites et éruptions de CO₂ : dangers pour les êtres vivants, annihilation d'efforts importants de maîtrise du CO₂ atmosphérique ;
- contamination de l'environnement (dont les nappes phréatiques) par le CO₂ ou des impuretés qu'il contient (métaux lourds, autres polluants, bactéries) et effets sanitaires subséquents ;
- sismicité induite et mouvements de terrain.

Ces effets peuvent découler d'un certain nombre de scénarios plus ou moins bien connus (figure 7). INERIS (2010) indique que « certains processus sont actuellement méconnus, notamment ceux relatifs à l'impact des perturbations thermo-hydro-mécano-chimique (THMC) sur les éléments traces ou bien au comportement bio-géochimique des micro-organismes à grande profondeur. D'autres mécanismes sont mieux connus, et leur occurrence est fort probable ». D'autres scénarios sont également mentionnés dans GESTCO (Christensen et al., 2004), comme la fracturation de la roche de couverture sous l'effet de la pression du fluide injecté, de manière similaire à la technique de fracturation hydraulique.

Certains promoteurs du CCS ont affirmé que « Le stockage de CO₂ devient plus sûr avec le temps » (ZEP & EBTP, 2012). En réalité, si la fixation du carbone par les procédés

géochimiques augmente en effet avec le temps (voir paragraphe 2.4.3), il est faux de dire que la probabilité de fuite diminue avec le temps. Plusieurs processus pouvant aboutir à une fuite se produisent sur une échelle de temps de plusieurs dizaines d'années : corrosion des éléments constitutifs du puits d'injection, diffusion du CO₂ d'un point à un autre de la nappe aquifère, création de nouveaux chemins de percolation lors de mouvements sismiques, etc. L'INERIS (2010b) indique que « *des phénomènes d'occurrence soudaine en surface peuvent avoir lieu tout en étant initiés par des mécanismes profonds à cinétique plutôt lente* ».

4.4. Une législation européenne peu responsabilisante

Au niveau européen, la directive 2009/31/CE relative au stockage géologique du carbone prépare le terrain législatif pour d'éventuels projets de stockage. Cette directive, actuellement en cours de transposition dans la législation des états membres, prévoit les modalités selon lesquelles des projets de stockage peuvent voir le jour dans les pays qui y consentent.

Si la directive a le mérite de définir des conditions minimales pour le stockage géologique du CO₂, on peut cependant s'inquiéter de la faiblesse de certaines de celles-ci.

Il est notamment prévu que la responsabilité du site de stockage peut être transférée de l'exploitant à l'autorité compétente après une période minimale de 20 ans prenant court à la fin de la période d'injection. Pour un stockage devant durer au minimum plusieurs siècles, utilisant de surcroît une technique nouvelle dont le retour d'expérience est lacunaire (INERIS, 2010a, 2010b), une limitation de la responsabilité à 20 ans peut sembler dérisoire. D'autant que la directive précise que cette durée peut encore être réduite « *si l'autorité compétente est convaincue que tous les éléments disponibles tendent à prouver que le CO₂ stocké restera confiné parfaitement et en permanence* » (article 18 §1).

Une autorité complaisante pourrait donc accepter de prendre la responsabilité du stockage dès la fin de l'injection, libérant ainsi l'exploitant de sa responsabilité. Quand on sait la faiblesse des connaissances actuelles en matière de stockage géologique du CO₂ et les incertitudes qui pèsent sur cette technique, cette possibilité de dérogation semble totalement inadéquate.

Par ailleurs, le transfert de responsabilité doit logiquement s'accompagner du versement par l'exploitant d'une contribution financière à l'autorité compétente qui prend en charge la surveillance du site. Cette contribution « *couvre au moins le coût prévisionnel de la surveillance pendant une période de trente ans* » (article 20 §1).

A nouveau, ce minimum est bien trop faible quand on sait que les sites de stockage devraient être surveillés pendant des périodes nettement plus longues. Et que si une fuite se déclare après quelques années, les coûts de gestion à charge des pouvoirs publics peuvent être extrêmement élevés. Or, sauf en cas de faute prouvée de la part de l'exploitant, la directive précise qu' « *il n'y a pas d'autre récupération de frais après le transfert de responsabilité* » (article 18 §7).

Le mécanisme de transfert de responsabilité prévu dans la directive semble avoir été conçu avec le souci principal de ne pas décourager les investissements privés dans le CCS. L'exigence de sécurité et le souci d'une gestion saine des finances publiques n'ont pas reçu la même attention. Actuellement, le développement du stockage géologique du CO₂ en Europe pourrait ainsi se faire sur le mode de la privatisation des gains et de la socialisation des risques¹².

¹² De manière similaire, des mécanismes de limitation de la responsabilité des exploitants ont été mis en place pour permettre le développement de l'industrie nucléaire.

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS, 2011) estime que « même si la directive 2009/31/CE sur le stockage géologique du CO₂ établit un cadre juridique pour cette filière industrielle, de nombreuses questions scientifiques et techniques demeurent afin de garantir sa sécurité ».

5. Économie et coûts

5.1. Des surcoûts qui rendent difficile la viabilité économique

Le CCS est une technologie coûteuse. Par rapport à une centrale thermique classique, le surcoût est notamment dû à la surconsommation d'énergie primaire des centrales équipées en CCS : il leur faut entre 11 et 40 % de combustible en plus pour produire la même quantité d'électricité. Et d'autres facteurs viennent encore alourdir la facture, pour arriver à une production électrique plus chère de 25 à 100 % (GIEC, 2005). Dans la courbe des coûts de McKinsey (2009), le CCS figure parmi les options de mitigations les plus chères.

La plateforme ZEP (Zero Emission Platform) rassemblant les principaux stakeholders industriels du CCS en Europe¹³ a réalisé une étude détaillée des coûts de la chaîne CCS (ZEP, 2011a, 2011b). Cette étude est présentée par ses auteurs comme « *la meilleure estimation actuelle des coûts pour de nouvelles centrales électriques équipées en CCS qui entreraient en fonction en Europe dans les années 2020* ».

Cette étude envisage deux scénarios pour les centrales équipées en CCS :

1. le scénario BASE prend en compte les technologies de captage actuelles et prouvées et concerne les centrales qui seraient construites juste après la phase de démonstration;
2. le scénario OPTI prend en compte les optimisations et améliorations technologiques attendues par le secteur juste après la mise en service des premières centrales commerciales.

Les résultats principaux sont présentés dans le graphe de la figure 8.

¹³ La plateforme ZEP a été fondée à l'initiative de la Commission européenne en 2005 et constitue un lobby influent en faveur du CCS.

The Levelised Cost of Electricity (LCOE) of integrated CCS projects (blue bars) compared to the reference plants without CCS (green bars)

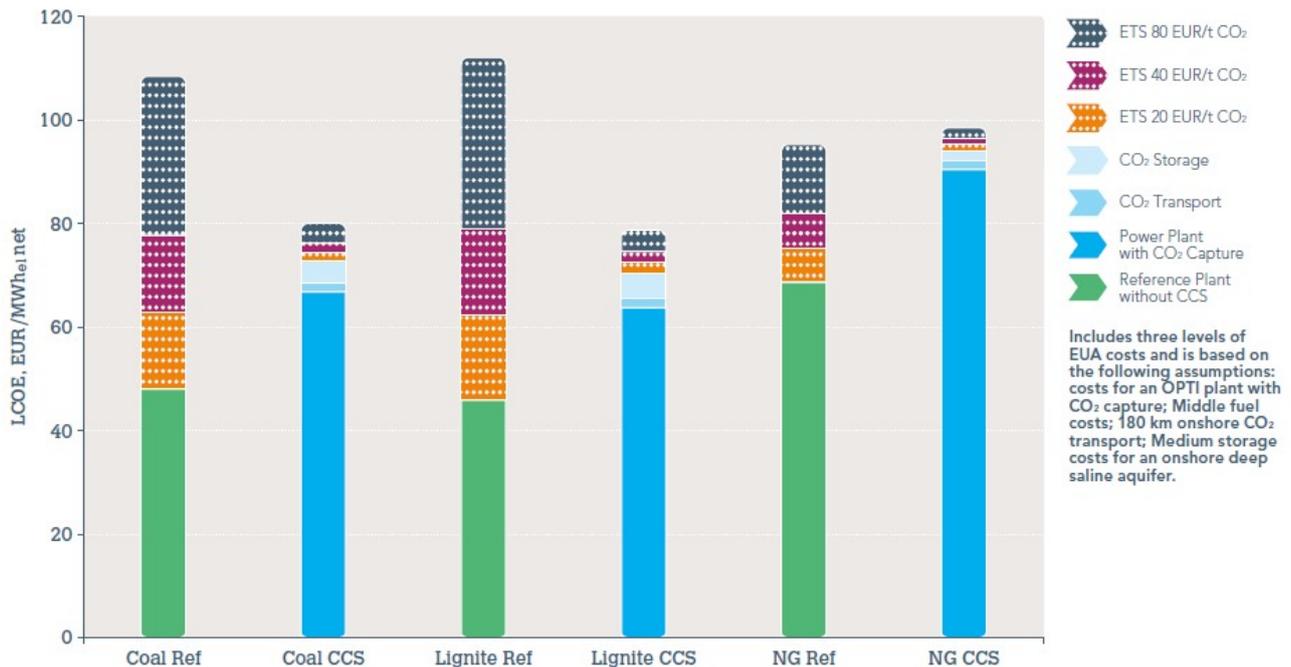


Figure 8 : LCOE¹⁴ pour des centrales (charbon, lignite et gaz naturel) équipées ou non en CCS pour le scénario le plus favorable (OPTI). Pour le scénario BASE, il faut ajouter légèrement plus de 10 EUR/MWh aux coûts de captage. Les trois composantes supérieures des histogrammes correspondent à trois hypothèses sur le coût des permis d'émissions de CO₂ dans le cadre du système ETS. L'estimation des coûts dans cette étude est basée les valeurs de fin 2009 (ZEP, 2011a).

Le captage est, de loin, l'étape la plus chère du CCS, même si les contraintes de transport et de stockage seront déterminantes, tant pour la localisation que pour la décision de construire ou non une centrale équipée en CCS.

Le coût des émissions de CO₂ évitées est respectivement d'environ 40 et 50 EUR/tCO₂ pour les centrales à charbon OPTI et BASE, tandis qu'il est respectivement d'environ 90 et 120 EUR/tCO₂ pour les centrales à gaz OPTI et BASE. Les auteurs de l'étude espèrent une diminution rapide des coûts de captage¹⁵.

Typiquement, une centrale au charbon émet 1 tCO₂/MWh, là où une centrale au gaz émet environ la moitié. L'infrastructure de captage permet donc de capter moins de CO₂ sur une centrale au gaz que sur une centrale au charbon, d'où un coût plus important par tonne de CO₂ évitée. A contrario, le surcoût du CCS par MWh d'électricité produite est inférieur pour le gaz étant donné qu'il y a moins de CO₂ à compresser, transporter et stocker.

Un prix élevé du carbone sur le marché ETS est nécessaire pour rendre le CCS viable économiquement. Pour les centrales à charbon, le prix à atteindre (> 40-50 EUR/tCO₂) est moins élevé que pour le gaz (> 90-120 EUR/tCO₂).

14 Le Levelised Cost of Electricity (LCOE) représente le coût d'un système de production électrique au cours de son cycle de vie complet. Répartir la totalité des coûts sur l'ensemble de la production permet de comparer des technologies différentes. Certaines technologies ont un coût important en investissement initial, mais un coût d'exploitation relativement faible, comme les renouvelables ou, dans une moindre mesure, le charbon. Pour d'autres comme le gaz, c'est l'inverse.

15 Seuls les résultats du scénarios OPTI sont mis en avant dans la synthèse du rapport ZEP, ce qui semble indiquer une volonté du secteur de présenter l'estimation des coûts la plus optimiste.

Cependant, l'atteinte de prix élevés du carbone sur le marché ETS ne garantit pas le déploiement du CCS. En effet, si un prix élevé du carbone est nécessaire pour rendre les centrales équipées en CCS compétitives vis-à-vis des centrales fossiles non équipées, il faut aussi noter que ce prix élevé avantagerait plus encore les filières renouvelables moins émettrices, qui pourraient dès lors devenir plus intéressantes financièrement que les centrales CCS. D'autre part, le surcoût lié au CCS se retrouve majoritairement dans les investissements initiaux, alors que les bénéfices liés à un prix élevé du carbone concerneraient les coûts d'exploitation.

La majorité des acteurs estiment maintenant que le CCS ne pourra être viable sans un soutien financier important de la part des pouvoirs publics. Le « marché » ne développera pas spontanément le CCS affirme l'AIE. La plateforme ZEP mène un lobby actif pour que des mécanismes de soutien (autres que le marché ETS) soient mis en place rapidement (feed-in tariffs, contrats d'achat CCS, garanties publiques de prêts, déductions fiscales, etc.) (ZEP, 2012).

Par ailleurs, les applications industrielles du CCS, ainsi que l'équipement de centrales existantes, devraient être plus coûteuses que la construction de centrales neuves équipées en CCS (McKinsey, 2008).

5.2. Des étapes plus ou moins bien chiffrées

Pour le captage, ce sont les étapes de séparation du CO₂ ainsi que sa compression qui sont coûteuses, notamment à cause du surplus de consommation d'énergie primaire. A eux seuls, les différents surcoûts liés au captage correspondent déjà à une augmentation de 30 à 50 % du coût de l'énergie produite dans le scénario OPTI¹⁶, et de 50 à 70 % dans le scénario BASE.

Le transport est l'étape la moins coûteuse. Les pipelines semblent plus compétitifs pour transporter de larges volumes sur des distances courtes à moyennes, tandis que le bateau le serait pour des volumes réduits, mais des distances plus longues. Cependant, la question de la responsabilité financière pour la mise en place d'un réseau de pipelines intégrant différents sites de captage et de stockage n'est pas résolue.

Le stockage est le maillon pour lequel l'information sur les coûts est la plus lacunaire. Les chiffres présentent donc d'importantes incertitudes (figure 9).

¹⁶ Avec des hypothèses légèrement différentes, l'étude PCS-CCS (Piessens et al., 2008) arrive à des surcoûts de 27 à 45 %, toujours sans prendre en compte le transport et le stockage, ni le mécanisme ETS.

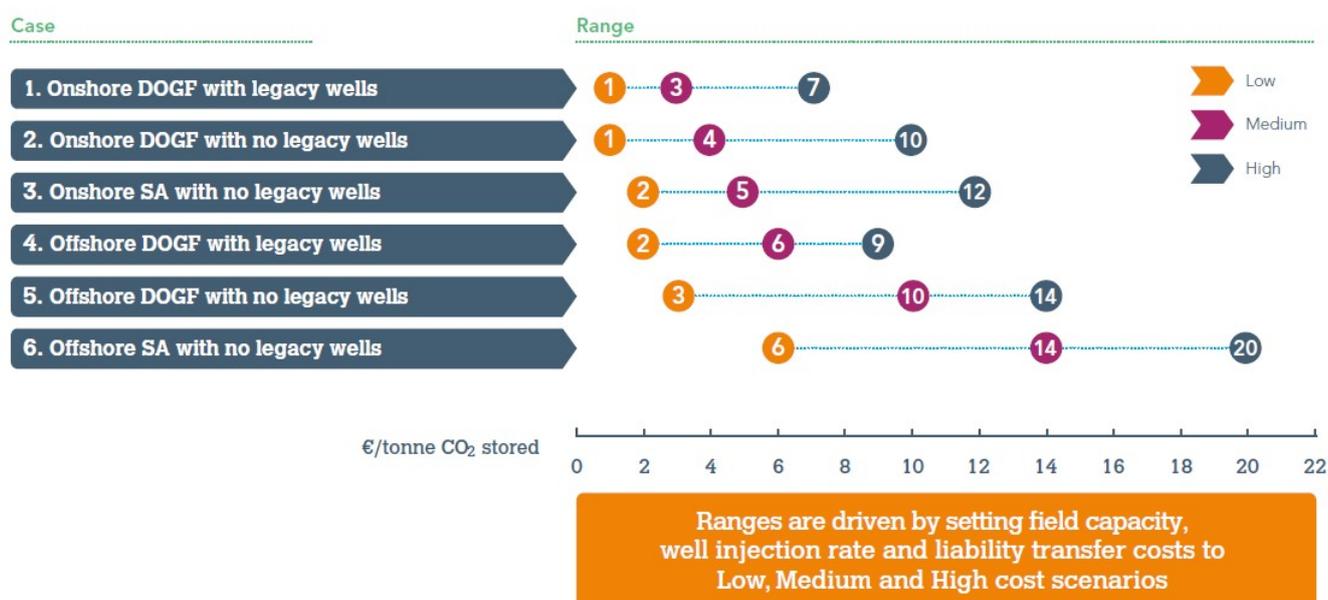


Figure 9 : Les coûts de stockage peuvent varier de 1 à 20 EUR/tCO₂ selon ZEP (2011a).

Le stockage offshore est plus cher qu'onshore ; les aquifères salins (SA) sont plus chers que les gisements d'hydrocarbures épuisés (DOGF) ; la capacité de stockage, la profondeur et l'injectivité influencent fortement les coûts.

Les sites les plus nombreux sont de petite capacité (25-50 MtCO₂) et en conséquence non-viables d'un point de vue économique. La majeure partie des capacités estimées se trouve cependant dans des réservoirs de capacité plus importante (>200 MtCO₂) : des gisements épuisés, ou plus encore, des aquifères salin offshore et onshore. Les auteurs de l'étude recommandent de se focaliser sur ce type de réservoir, mais ne manquent pas de noter que « les réservoir les moins chers sont aussi ceux qui contribuent le moins à la capacité totale disponible ».

Comme le soulignent les auteurs de l'étude (ZEP 2011a), en cas de déploiement de la technologie CCS, les sites présentant les meilleures caractéristiques, économiquement plus intéressants, seront utilisés en premier. Cela pourrait mener à une augmentation progressive des coûts de stockage : une fois les meilleurs sites remplis, l'industrie devra se rabattre sur des sites moins accessibles, de plus petite capacité ou de moins bonne injectivité.

5.3. Une haute sensibilité aux hypothèses

L'étude ZEP (2011a) considère un prix de 2,4 EUR/GJ pour le charbon et 8 EUR/GJ pour le gaz, tout en soulignant qu'il existe « une incertitude considérable » sur l'évolution de ces prix. L'impact d'une variation du prix du combustible est plus important pour le gaz que pour le charbon, ce qui reflète la structure des coûts de ces modes de production. Vu la surconsommation en combustible des centrales CCS par rapport aux centrales non équipées, l'accroissement du prix des combustibles est défavorable à la viabilité des centrales CCS.

L'étude ZEP considère une durée de fonctionnement de 7500 h/an pour calculer les coûts. En cas d'utilisation réduite à 5000 h/an, le coût par MWh produit devient nettement plus élevé

(augmentation du LCOE de 19 EUR/MWh). Ce facteur pourrait à lui seul remettre en cause une viabilité économique déjà fragile des centrales équipées en CCS. C'est en particulier le cas pour des pays fortement équipés en énergies renouvelables, ces dernières ayant généralement une priorité supérieure pour l'accès au réseau électrique¹⁷.

La manière dont se passe le transfert de responsabilité entre l'exploitant et les autorités publiques après la période d'exploitation influence les coûts de stockage. La responsabilité est-elle limitée ou entière en cas d'accident ? Combien de temps l'exploitant reste-t-il responsable ? Quelle somme est versée par l'exploitant aux autorités publiques pour que celles-ci reprennent à leur compte la responsabilité ? Telles sont les principales questions qui influencent ces coûts.

Soulignons que les évaluations de coûts présentées correspondent à un fonctionnement théorique optimal : pas de coûts spéciaux, pas d'imprévus, pas d'accidents. Comme l'indique CAS (2012), « *les estimations de coûts disponibles aujourd'hui doivent être validées lors de la mise en place des projets (...) des incertitudes pesant notamment sur les coûts réels de la surveillance et du suivi des sites à long terme* ».

6. Conclusion

La technologie de captage et stockage du carbone (CCS) poursuit un seul but : celui de diminuer les émissions atmosphériques de CO₂ de sources fortement émettrices qui utilisent des combustibles fossiles. En ce sens, elle agit comme un remède qui pourrait faire disparaître un symptôme particulièrement gênant, mais sans en supprimer la cause.

De lourdes incertitudes pèsent sur le CCS. Sur le plan économique, il ne peut actuellement se développer sans un soutien public massif, et il n'est pas acquis qu'il puisse devenir un jour économiquement viable (chapitre 5). Par ailleurs, l'analyse de risques doit encore progresser. L'absence de retour d'expérience en matière de stockage géologique du CO₂ sur de longues durées laisse irrésolues d'importantes questions de sécurité et de responsabilité (chapitre 4). La limitation de la responsabilité de l'exploitant pour le stockage (montant et durée de prise en charge) correspond en pratique à un report des coûts réels de gestions à long terme du stockage sur les générations futures. Sur le plan climatique, le potentiel réel du CCS fait débat, notamment à cause des incertitudes pesant sur la permanence du stockage (chapitre 3).

Il faut donc se garder de placer trop d'espoir dans le CCS.

Tout en déclarant que « *le CCS est une option clé pour la réduction des émissions* », l'AIE (2011) souligne que son déploiement est « *incertain* ». Elle envisage de ce fait un scénario compatible avec la contrainte climatique où le CCS est quasi-absent jusqu'en 2035¹⁸.

La directive européenne 2009/31/CE sur le stockage géologique du CO₂ indique qu'il s'agit d'une « *technologie de transition* » dans la lutte contre les changements climatiques et indique que « *cette technologie ne devrait pas être utilisée comme une incitation en faveur d'un accroissement des centrales électriques fonctionnant avec des combustibles fossiles. Son développement ne devrait pas conduire à une réduction des efforts visant à soutenir les politiques d'économie d'énergie, les énergies renouvelables et d'autres technologies sûres et*

¹⁷ Indépendamment des questions environnementales, les centrales électriques dont les coûts marginaux de production sont les plus faibles sont mises prioritairement en fonctionnement (notion de merit order). Il en va ainsi de la production éolienne ou solaire, dont les coûts marginaux sont quasi nuls.

¹⁸ Ce scénario (Delayed CCS 450 Case) fait un recours accru au nucléaire. A côté de son scénario climatique principal (450 Scenario), l'AIE étudie également un autre scénario climatique où la part du nucléaire recule fortement (Low Nuclear 450 Case), mais qui fait alors un recours important au CCS. Les différences de coûts d'investissement entre les scénarios de l'AIE compatibles avec la contrainte climatique sont modérées (moins de 10%), surtout au vu des incertitudes pesant sur ces estimations. On peut toutefois regretter que n'ait pas été étudié un scénario climatique sans nucléaire ni CCS, mettant plus de priorité sur la maîtrise de la consommation.

durables à faibles émissions de CO₂, tant en matière de recherche qu'en termes financiers. »

C'est que le risque est réel de voir l'attention et les moyens détournés de solutions prioritaires et durables en matière d'énergie (sobriété, efficacité, renouvelables) au profit du CCS, que ce soit pour la recherche, l'investissement ou les différentes formes de soutien public.

La Commission européenne vient de donner une illustration claire de ce risque. Dans le cadre de son initiative NER300, large programme destiné à financer de nouveaux projets d'énergie décarbonée pour lutter contre les changements climatiques, la sélection des projets s'oriente vers une attribution de 60 % des fonds disponibles à 2 ou 3 projets CCS, tandis que 16 projets d'énergie renouvelable se partageront les 40 % restants (Buckens, 2012).

Il existe également un risque de se focaliser uniquement sur le CO₂ et de mettre de côté d'autres aspects de la durabilité. Or, que l'on songe aux mines de charbon, à l'exploitation des gaz de schistes, aux marées noires, aux sables bitumineux, des plateaux du Shanxi aux collines du Colorado, du delta du Niger aux forêts de l'Alberta, l'extraction, le transport, la transformation, et la combustion des combustibles fossiles ont bien d'autres effets néfastes que les seules émissions de CO₂. Par la diminution des rendements qu'il occasionne, le CCS impose de brûler plus de ressources fossiles pour produire la même quantité d'électricité. Le CCS augmentera donc les impacts négatifs (hors CO₂) du recours aux énergies fossiles.

De manière illustrative, le CCS est aujourd'hui mis en avant par l'industrie pétrolière pour « *verdir* » l'exploitation de ressources non-conventionnelles polluantes. Le projet Quest, un des plus importants projets de CCS au monde, est mis en place par Shell au Canada avec l'intention de ramener les émissions de CO₂ liées à l'exploitation des sables bitumineux à un niveau plus proche de celui du pétrole conventionnel – mais toujours supérieur à ce dernier (WWF, 2009). Pour ce faire, la compagnie va recevoir près d'un milliard de dollars canadiens en subsides, et les réductions d'émissions de CO₂ obtenues seront comptabilisées doublement pour l'attribution de crédits carbone (Bream, 2012). Il en résultera donc une augmentation des émissions globales de CO₂, comme dans les projets de type EOR (voir paragraphe 2.4.2).

Plus que le climat, ce que les promoteurs du CCS semblent vouloir sauver, c'est une organisation économique basée sur l'exploitation des ressources fossiles et les profits que cette exploitation engendre. Le renoncement à l'exploitation de la majeure partie des ressources fossiles, nécessaire pour faire face aux enjeux climatiques, remettrait ces intérêts en jeu de façon radicale¹⁹. La concurrence est donc bien réelle entre le CCS – qui pourrait permettre de brûler un peu plus de ressources fossiles – et des mesures telles que la maîtrise des consommations énergétiques et le développement des énergies renouvelables – qui permettent de sortir plus rapidement de l'ère fossile.

Pour autant, la technologie CCS n'est pas à rejeter définitivement dans son ensemble. Avec le préalable d'une garantie de solutions de stockage sûres (condition aujourd'hui non réalisée), et mis en œuvre dans une logique réellement axée vers une transition énergétique durable (dégagée des intérêts financiers sus-mentionnés), il n'est pas exclu que le CCS trouve à l'avenir des applications pertinentes, complémentaires avec les autres mesures de mitigation. Sans préjuger du résultat d'une étude de pertinence détaillée, citons :

- l'application du CCS à des industries telles que la sidérurgie, qui existeront vraisemblablement encore longtemps²⁰;

¹⁹ Selon Carbon Tracker (2012), la valorisation boursière des compagnies pétrolières, reposant notamment sur les réserves estimées de celles-ci, pourrait s'écrouler si la contrainte climatique aboutissait à la décision de laisser la majeure partie de ces réserves dans le sous-sol.

²⁰ Pour la fabrication d'acier à partir de minerai, des procédés alternatifs à l'usage du coke en haut-fourneaux existent, tels que la réduction directe (DRI) utilisant généralement du gaz naturel.

- l'application transitoire du CCS à des centrales au gaz permettant de pallier l'intermittence de certaines productions électriques renouvelables, comme le photovoltaïque ou l'éolien²¹;
- l'association bioénergie et CCS, qui permet également de faire face à l'intermittence d'autres filières, avec les réserves exprimées au paragraphe 2.5.

* *

*

La transition vers une société durable nécessite de résoudre le défi climatique. En conclusion d'un colloque²², le professeur Albert Germain soulignait que pour arriver à une société bas carbone à l'horizon 2050, il sera impératif de faire preuve de discernement : beaucoup de solutions sont proposées, mais toutes n'ont pas la même pertinence, et les moyens sont limités. Il ne sera pas possible de développer toutes les filières, non seulement parce que nos moyens financiers sont limités, mais plus fondamentalement encore parce que les moyens humains et les compétences le sont aussi. On ne peut se permettre d'investir dans une voie sans issue.

En miroir de cette analyse, il y a l'invitation à tous ceux qui ont des moyens, des compétences ou du talent, à ne pas les gaspiller dans de fausses solutions.

7. Liste des sigles et acronymes

AEE Agence européenne pour l'environnement

AIE Agence internationale à l'énergie

CAS Centre d'analyse stratégique

CCS Carbon Capture and Storage – captage et stockage du carbone

DOGf Depleted Oil and Gas Fields – champs pétroliers et gaziers déplétés

DRI Direct Reduced Iron – réduction directe du minerai de fer

EBTP European Biofuels Technology Platform

ECMBR Enhanced Coal Bed Methane Recovery – récupération assistée de méthane dans les veines de charbon

EGR Enhanced Gas Recovery – récupération assistée de gaz

ETS Emissions Trading Scheme - système communautaire d'échange de quotas d'émission

EOR Enhanced Oil Recovery – récupération assistée de pétrole

GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IGCC Integrated Gasification Combined Cycle – cycle combiné à gazéification intégrée

IEEP Institute for European Environmental Policy

INERIS Institut national de l'environnement industriel et des risques

LCOE Levelised Cost of Electricity – coût moyen actualisé de l'électricité

²¹ Soulignons qu'il existe d'autres moyens, encore peu développés, pour faire face à l'intermittence, comme la gestion temporelle de la demande ou la mise en place de capacités de stockage. Il faut par ailleurs noter que des énergies renouvelables telles que l'hydroélectricité, la géothermie, la bioénergie ou l'énergie marémotrice ne sont pas intermittentes ou ont une intermittence limitée.

²² « La biomasse, ressource énergétique et chimique du futur », organisé par l'AILg le 7 juin 2012.

OCDE Organisation de coopération et de développement économiques

SA Saline Aquifer – aquifère salin

ZEP European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (Zero Emission Platform)

8. Bibliographie

- AEE, (2011). Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy.
- AIE, (2011). World Energy Outlook 2011, Paris.
- Buckens M.-M., (2012). NER300: Three CCS projects to be co-funded. Europolitics, online publishing : 20 July 2012.
- Bream R., (2012). Shell to build oil sands CO₂ capture plant. Financial Times, online publishing: 5 September 2012.
- Carbon Tracker Initiative, (2012). Unburnable Carbon – Are the world's financial markets carrying a carbon bubble?
- CAS, (2012). Des technologies compétitives au service du développement durable.
- Cook P.J., (1999). Sustainability and nonrenewable resources. Environmental Geosciences, 6(4), 185-190.
- Daly H., (1990). Towards some operational principles of sustainable development. Ecological Economics, vol. 2, issue 1, p. 1-6.
- Christensen et al., (2004). GESTCO : Geological Storage of CO₂ from Fossil Fuel – Summary report, Second edition.
- GIEC, (2001). Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- GIEC, (2005). Piégeage et stockage du dioxyde de carbone – Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique.
- GIEC, (2011). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN). Cambridge University Press, Cambridge.
- Greenpeace, (2008). False Hope – Why carbon capture and storage won't save the climate.
- Hovorka et al., (2006). Measuring permanence of CO₂ storage in saline formations : the Frio Experiment. Environmental Geology 13, 105-121.
- IIEP, (2010). Anticipated Indirect Land Use Change Associated with Expanded Use of Biofuels and Bioliqids in the EU – An Analysis of the National Renewable Energy Action Plans.
- INERIS, (2010a). Etat des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO₂. Rapport n°1 : les risques en phase d'injection.
- INERIS, (2010b). Etat de l'art et analyse des risques pour un stockage de CO₂ en aquifère salin.
- INERIS, (2011). Fiche : Les risques liés au stockage géologique du CO₂ en aquifère salin profond.
- Leopoldina, (2012). Bioenergy – Chances and Limits.
- Levina E., (2012). Making CCS Viable. Journal of the IEA, Issue 2, p. 32.
- McKinsey, (2008). Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics.
- McKinsey, (2009). Pathways to a low-carbon economy.
- Meinshausen et al., (2009). Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. Nature 458, 1158-1162.

- Piessens et al., (2008). Policy Support System for Carbon Capture and Storage (PSS-CCS). Belspo, Brussels.
- Wikipédia, (2012). List of pipeline accidents in the United States in the 21st Century, consulté le 13 août 2012.
- WWF & The Co-operative Bank, (2009). Carbon Capture and Storage in the Alberta Oil Sands – A Dangerous Myth.
- ZEP, (2006). The final report from Working Group 1 – Power Plant and Carbon Dioxide Capture.
- ZEP, (2011a). The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage – Post-demonstration CCS in the EU.
- ZEP, (2011b). The Costs of CO₂ Capture – Post-demonstration CCS in the EU.
- ZEP, (2012). CCS: Creating a secure environment for investment in Europe.
- ZEP & EBTP, (2012). Biomass with CO₂ Capture and Storage (Bio-CCS) – The way forward for Europe.

Global transition towards forest restoration and sustainable land uses

Patrick MEYFROIDT^{1,2}, Derek BRUGGEMAN¹, Isaline JADIN^{1,2},
Yann le POLAIN de WAROUX¹, Eric F. LAMBIN^{1,3}

1. Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research, Earth and Life Institute, Université catholique de Louvain, Place Louis Pasteur 3, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium
2. F.R.S-FNRS, Belgium
3. School of Earth Sciences and Woods Institute, Stanford University, 473 Via Ortega, Stanford, CA 94305, United States

1. Introduction

One of the key dimensions of a transition towards sustainable societies is to combine, on the one hand, the provision of food and fiber for humanity and, on the other hand, the preservation of forest and other natural ecosystems, and of the services they provide. On a global scale, population growth and increases in per capita consumption of commodities produced from the land are expected to continue to lead to a growing pressure on land (Lambin and Meyfroidt, 2011). Over the last decade, commodities produced for global markets, whose production occupy vast amount of lands, and with high income elasticity (e.g., soybean, palm oil, beef, coffee, timber), have expanded rapidly. Intensification of land use, made possible by technological progress and better management practices, has the potential to satisfy the bulk of future increases in demand (Godfray et al., 2010). But as long as the rate of increase in demand remains greater than the rate of productivity increase, conversion of land under natural vegetation cover to productive uses will be unavoidable.

Yet, although global rates of tropical deforestation remain alarmingly high, they have decreased over the past decade. Tropical landscapes are dynamic, and many forest areas once cleared or degraded are abandoned a few years or decades later. Restoring natural or seminatural forests on abandoned land can potentially mitigate the environmental impacts of deforestation and forest degradation (Lamb et al., 2005, Chazdon, 2008). A handful of developing, tropical countries have recently been through a forest transition, thus shifting from shrinking to expanding forests (including tree plantations) at a national scale – e.g., Vietnam, Costa Rica, China, India (Mather and Needle, 1998, Meyfroidt and Lambin, 2011). Forest transitions result from multiple trends—natural regeneration of forests, forest plantation, adoption of agroforestry, continuing deforestation—that combine in various ways through time and space. Forest transition is sometimes presented as a quasi-deterministic process, implying that the long-term development of land change in a country is expected to follow this trajectory of decline and regrowth, which can only be delayed or accelerated by policies. This view has been challenged for its analogy with modernization theory, whereby countries are assumed to move through a standard pattern of development to a modern economy. Some authors argued that a global forest transition might be attainable in the coming decades.

The objectives of this paper are, first, to review the current state of global land use and expected trends over the period 2000-2030, second, to discuss the knowledge on causes and impacts of past and ongoing forest transitions, and third to examine the prospects and policy options for a global forest transition and transition towards sustainable land uses. Throughout this text, the focus will be on forests, as they constitute the main natural vegetation on which human land uses expand globally, provide major ecosystem services to humanity, and were the main focus of our recent research. Our conclusions remain broadly applicable to other biomes, including savannas or natural grasslands.

2. Current state and future trends of global land use

Below, we summarize various estimates of global land use for the year 2000 and the period 2000-2010 (Table 1, adapted and updated from Lambin and Meyfroidt, 2011), retaining low and high estimates. The most important - and least known - figure for global land use budgeting is the area of potential available cropland (PAC). Estimates of this area have high policy significance, as the debates over risks and benefits of large scale land acquisitions and foreign investments in agriculture, biofuels, afforestation for climate change mitigation and sustainable agricultural standards such as the Roundtables for Responsible Soy and Sustainable Palm Oil all rest on assumptions on the availability of “unused” land. A recent global assessment of agro-ecological zones identified 445 Mha globally that were not yet cultivated, non-forested, non-protected, and populated with less than 25 persons/km², and therefore assumed to be available for potential cropland expansion if one attempts to minimize ecological costs of land conversion (World Bank, 2010). A more recent study adopted a spatially-explicit, country-by-country approach to estimate the area of PAC, based on a limited number of regional or country case studies including the South American Chaco, Cerrado and Amazon arc of deforestation, the Democratic Republic of Congo, Indonesia and Russia (Lambin et al., forthcoming). This study suggests that, once social, institutional, economic and physical constraints are taken into account, there is less PAC than is generally assumed, and that the social and ecological costs of converting that remaining land would be significant, both in terms of carbon and biodiversity (see Table 1). A more realistic estimation of the availability and geographic distribution of the potential available cropland – or land reserve – is a priority for land use planning, policy foresight, and to inform markets and potential investors.

Table 1: Main land uses in 2000 and 2010 in million hectares (Mha). Sources: see Supplementary information in Lambin and Meyfroidt (2011), and Lambin and Meyfroidt (2012) for updates and figures for 2000-2010.

	Area 2000 (Mha)		Annual change 2000-2010 (Mha)	
	Low	High	Low	High
Cropland	1,510	1518	+0.2	+1.7
Pastures	2,800	3,410	-7.7	-7.2
Natural forests	3,143	3,871	-11.3	-10.1
Gross deforestation			-15.2	-13
Gross natural regrowth			+3.9	+2.9
Planted forests	126	215	+4.9	+4.9
Urban built-up area	60	73	+1.0	+2.7
Potential available cropland	222	445		

Land changes are increasingly caused by global scale factors, with a growing separation between the locations of production and consumption of land-based commodities (Lambin and Meyfroidt, 2011). A large and growing fraction of forest conversion today is associated with commodities produced for global markets. Land use decisions related to these commodities derive from the interactions between factors in distant markets, mostly associated with wealthy urban consumers, and local-scale factors (DeFries et al., 2010, Boucher et al., 2011). The distant factors affecting land use are not restricted to trade patterns, but also include remittances sent by migrants, the specific organization of global commodity value chains,

channels of foreign investments in land, the transfer of market or technological information to producers via a diversity of networks (from farmer associations to internet and cell phones), and the development and promotion of niche commodities that target narrow but wealthy market segments with high value commodities produced in limited quantities (Le Polain de Waroux and Lambin 2012). All these multiple demands for land cumulate to lead to rapid land conversion: demands for more cropland to increase food, feedstocks and biofuel production; for industrial forestry to produce timber; for fast growing trees for carbon sequestration; and for urban and recreational spaces to accommodate a growing urban population (Table 2). Moreover, demands for protected areas for nature and biodiversity conservation, and for natural or managed ecosystems to provide a range of regulating and cultural ecosystem services further contribute to potential conflicts between various land uses.

Globally, between 2000 and 2030, feeding a growing population may require an additional 2.7-4.9 Mha of cropland per year on average, depending on future diets, food wastages, and food-to-feed efficiency in animal production. Most of this expansion is likely to occur in Latin America and Africa, while cropland is still expected to decline in developed countries. Meeting the current policy mandates of biofuels use would require an increase by 1.5-3.9 Mha per year of cropland area devoted to feedstock. Projections of pasture expansion range between 0 to 5 Mha per year, depending on intensification of livestock production systems, which become increasingly decoupled from the land. Expansion would occur mainly in Latin America and East Asia, while pasture area would decrease in North America and Europe. Cities cover less than 0.5% of the Earth's land surface but urban area is predicted to more than double by 2030, according to the low scenario. Demand for industrial forestry will grow by 1.9-3.6 Mha per year, mainly in Asia and subtropical regions, to meet an increase in demand for wood products of 2.8-40.3%, depending on income elasticity of demand and on fuelwood substitution (Meyfroidt and Lambin, 2011). Industrial forestry may replace natural forests but will also encroach on agricultural land. Protected areas will continue to expand by 0.9-2.7 Mha per year. Land degradation negatively affects land productivity and makes about 1-2.9 Mha unsuitable for cultivation per year, with a high rehabilitation cost. In summary, the additional land demand for all agricultural, bioenergy, tree plantation, urban and nature conservation uses was estimated to range from 303 to 845Mha by 2030 compared to the 2000 baseline (Lambin and Meyfroidt, 2011). The main "friction points" in global land use are expected to be between forests and agriculture; urban land use and intensive agriculture; tree plantations and natural forests; bioenergy, feed crops and food crops; and intensive cropland and extensive agriculture (Lambin and Meyfroidt, 2012). Based on these global trends, total land demands in the coming decades could exceed the area of productive land that is potentially available, and productive land could become a scarce resource in most developing countries by 2030. Under that scenario, which already includes significant land productivity increases, lands with a lower productivity will be brought into use, and forests will continue to be converted for agriculture.

Table 2: Projected additional land use for 2000-2030 (in millions hectares). Source: Lambin and Meyfroidt (2011), and updates in Lambin and Meyfroidt (2012).

	<i>Low</i>	<i>High</i>
Additional cropland	81	147
Additional biofuel crops	44	118
Additional grazing land	0	151
Urban expansion	66	153
Expansion of industrial forestry	56	109
Expansion of protected areas	26	80
Land lost to land degradation	30	87
<i>Total land demand for 2030</i>	<i>303</i>	<i>845</i>

3. State of the knowledge on forest transitions

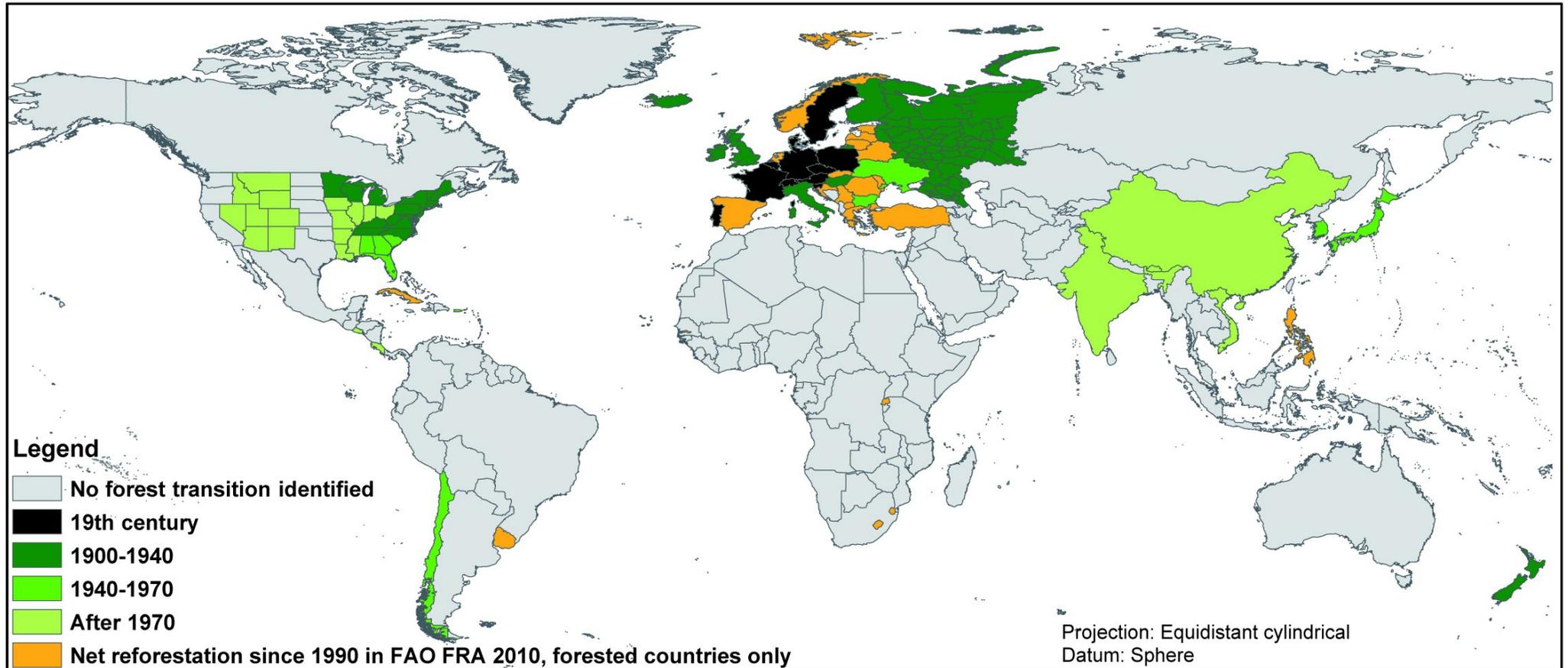
Estimating global rates of natural reforestation is challenging because detecting by remote sensing the signal of the slow regrowth of vegetation is more difficult than for the larger signal of clear-cutting (Meyfroidt and Lambin, 2011). Furthermore, different views exist on defining secondary forests and on whether reforestation should include some or all forms of tree plantations, or only naturally regenerating forests. Modified natural forests might represent around 66% of the global forest cover; natural regeneration of forests amounts to more than 2.2Mha/year in the tropics and at least 2.9 Mha/year globally; and as of 2010, planted forests covered around 264 Mha or 6.5% of the global forest area. Planted forests expanded by 4.9 Mha/year during the period 2000 to 2010. Refining estimates of reforestation rates requires remote sensing observations at higher spatial and temporal resolutions to separate gross from net deforestation and to isolate gross reforestation, based on a sampling scheme specifically designed for monitoring reforestation and combined with accurate spatial data on plantations to isolate the natural regrowth of forests. Improving the global estimate of the extent of secondary forests requires the use of baseline historical maps to trace the land-use history of forest areas. These monitoring requirements mean that analysis of forest transitions has substantial data uncertainties (Grainger, 2008). Forest-monitoring systems need to include dedicated sampling designs to measure, map, and characterize reforestation. Locations with the greatest potential for forest regrowth need to be identified.

Despite these data uncertainties, it is established that several countries in Europe and the United States experienced a forest transition during the nineteenth and twentieth centuries (Figure 1, Meyfroidt and Lambin, 2011). A few small countries in Latin America and some larger countries in Asia experienced such a transition in the late twentieth century. These forest transitions occurred through different pathways which are contingent upon the local socioeconomic and ecological contexts. A few generic processes of forest transition were identified (Rudel et al., 2005, Lambin and Meyfroidt, 2010), including agricultural intensification and industrialization driving labour scarcity in the agriculture and concentration of production in the most suitable land, possibly influenced by global markets; scarcity of forest products and services drives tree plantation, forestry intensification and forest protection by private and public actors, possibly influenced by global environmental ideologies and by national political factors external to the forest sector; and smallholder labour intensive tree-based land use intensification. Geographically (Meyfroidt and Lambin, 2011), in Central America and the Caribbean, reforestation occurs more commonly on abandoned land, usually associated with economic changes and globalization. Forest plantations are more common in subtropical and temperate South America, often driven by private actors, and in Asia, through a combination of decentralization and market-driven plantations or larger state-sponsored programs.

Afforestation policies may result in large-scale plantations but also in scattered woodlots on smallholders' plots. Land-use policies restricting activities on forestlands and agricultural changes also contributed to forest regrowth in Asia, often at a high cost to local populations. In sub-Saharan Africa, forest plantations and agroforestry expand locally in countries with high population densities and supportive forest policies. Multiple causes, social and environmental contexts, and path dependencies are associated with these forest cover changes. The factors driving deforestation also control reforestation, depending on particular circumstances and small contextual shifts, e.g., urbanization, economic development, rural wages, agricultural prices, population density, demand for wood products, land tenure reforms, and trade.

Because countries do not necessarily follow a regular pattern of forest cover changes, and the causes and outcomes of forest transitions vary, forest transition is to be seen as a contingent process, and as an empirical regularity rather than one stage in a predictable, universal and deterministic path of land use patterns. Forest transition graphs can play a positive role in public policy discourse as they point to opportunities for a reversal of 'deforestation' trends by appropriate policy actions (Meyfroidt et al., 2011). Such actions will, however, require understanding of the driving forces in their local context, rather than relying on generic forest transition dynamics as a 'law of Nature'. Recovery of tree cover only occurs under certain conditions. Extrapolating into the future past rates of deforestation or forest degradation, or assuming the automatic onset of forest recovery in a country are misguided.

Figure 1. Periods of recent forest transitions. Source and details: Meyfroidt and Lambin (2011).



 Meyfroidt P, Lambin EF. 2011.
Annu Rev. Environ. Resour. 36:343–71

Restoring forests in one country is generally associated with a significant outsourcing of forest exploitation to neighboring countries via increased imports of wood and sometimes agricultural products (Meyfroidt et al., 2010). This international displacement of land use through trade facilitates a forest transition in countries that increasingly meet their demand for wood and agricultural products through imports rather than by using their own land. For example, in Vietnam, the policies restricting forest exploitation that contributed to a forest transition, combined with the rapid development of the wood processing industry and the exports of wood products, led to an increase in legal and illegal imports of timber and a displacement of forest extraction to neighboring countries, such as Laos and Cambodia, equivalent to 39% of the regrowth in Vietnam's forests from 1987 to 2006 (Meyfroidt and Lambin, 2009). To some extent, international trade could allow allocation of land use to more productive lands, so that increasing deforestation in one place could spare a larger land area elsewhere (Mather and Needle, 1998, Angelsen, 2010). On one hand, wood and food production should be optimized spatially on the basis of the productive potential of forests and agricultural land, as well as on the environmental and social opportunity costs. On the other hand, negative environmental impacts associated with the long-distance transportation of products and the destruction of ecologically valuable forests should be minimized. International displacement of land use through trade thus reduces the global benefits of national policies to protect forests and promote reforestation. These policies therefore need to control this displacement and channel it toward areas where the impacts are minimal (or beneficial).

The ecological effects of reforestation are very variable, and depend on the residual deforestation of old-growth forests, the proportions of natural regeneration of forests and tree plantations, and the location and spatial patterns of the different types of forests (Meyfroidt and Lambin, 2011). Although generalizing is again difficult, the ecological benefits of secondary forests are generally positive, especially for carbon storage and hydrologic stability, but not necessarily high. The benefits of agroforestry systems vary greatly depending on their type and the land use they replace. Tree plantations often have negative environmental impacts when they replace ecologically diverse swidden areas, natural grasslands, or shrublands. They have mixed effects when they replace permanent agricultural land and mostly positive impacts, especially on soil properties and hydrological flows, when afforestation takes place on severely degraded land. Managing multifunctional mosaics of human-modified landscapes to preserve and restore ecosystem services is an emerging priority in the ecology and conservation literature (Lamb et al., 2005, Gardner et al., 2009). Forest transitions offer some potential in that respect, but much has still to be learned on this issue. Furthermore, net reforestation can conceal a continuing degradation or clearance of partly irreplaceable old-growth natural forests (Meyfroidt and Lambin, 2008, Echeverria et al., 2006). Increase of forest area is thus not a guarantee for a recovery of ecosystem services: the hydrological impacts of fast-growing trees can be mixed, biodiversity recovery slow, and carbon stock increments small. Large scale monocultures of exotic tree species can reduce the provision of ecosystem services. Cases of increase in tree cover associated with a decrease in the potential to restore biodiversity and/or in carbon stocks have been documented (Hall et al., 2012). Policies supporting afforestation and reforestation should not assume that it will lead indiscriminately to environmental gains.

4. Prospects and policies for sustainable forest transitions

This section discusses policy options that address the two complementary goals of reducing clearance and degradation of natural forests and encouraging ecologically and socially desirable forms of reforestation (Table 3). Policies to achieve a forest transition include approaches to improve the supply of land-demanding products, and to control the demand for them (Meyfroidt and Lambin, 2011) (Table 3). Various tools, or instruments, can contribute to

achieve these broad objectives.

Table 3: Approaches and Tools for promoting a global forest transition. Source: adapted from Meyfroidt and Lambin (2011), Table 2.

Approaches	
Increase the supply while decreasing environmental impacts	<ul style="list-style-type: none"> - Increase productivity & expand intensive production - Promote sustainable forest management / nature-friendly agriculture
--> BUT: Rebound effect and Spatial heterogeneity	
Control expansion over natural eco-systems	<ul style="list-style-type: none"> - Land use zoning / spatial planning & forest regulations - Off-farm economy
--> BUT: Displacement and global land scarcity	
Reduce and modify the demand	<ul style="list-style-type: none"> - Substitution of the most land-demanding and impacting products – e.g. change diets - Recycle & re-use - Increase efficiency & reduce wastes - More equitable food distribution
Tools	
Regulation / command-and-control tools	<ul style="list-style-type: none"> - Forestry & agricultural practices regulations (inc. enforcement) - Land use zoning - Trade policies
Market-based instruments	<ul style="list-style-type: none"> - Certification / ecolabelling - Payments for Ecosystem Services (inc. carbon offsetting, ecotourism...)
Other tools to promote changes in agricultural and forestry systems	<ul style="list-style-type: none"> - Extension services - Credits & subsidies - Land tenure reforms (including privatization, community-based natural resource management...) - Education & information
Other tools to reduce local reliance on land-based activities	<ul style="list-style-type: none"> - Development of off-farm economy - Migration policies - Education & family planning

4.1. Prospects for a global forest transition

Between 1980 and 2000, 83% of the agricultural expansion in the tropics came at the expense of intact or disturbed forests (Gibbs et al., 2010), mostly in the Amazon Basin, South-East Asia, and to a lesser extent West and Central Africa. Forested areas are highly affected by the recent wave of large-scale, cross-border land transactions carried out by transnational corporations: about 24% of the land deals are located in forested areas, representing 31% of the total surface of land acquisitions (Anseeuw et al., 2012). Continuing the recent trends, the deforestation from 2000 to 2030 might represent 152–303 Mha (Lambin and Meyfroidt, 2011). But with more proactive policy interventions, trade-offs between conserving forests and feeding the world’s population could be minimized given the low opportunity costs of

avoided deforestation and the small contribution of deforested areas to the recent increases in food production (Angelsen, 2010). In the recent decades, only around 10% of the increase in agricultural output came from expansion of agricultural lands over forests, the rest coming from productivity increases. With appropriate policies, most of the future increases in food production might thus be achieved, in theory, without further forest encroachment. In reality, this will depend on future productivity gains and on how much agriculture and other land uses expand on forest versus nonforested land, as well as on land with marginal versus high potential for agriculture (Meyfroidt and Lambin, 2011). Similarly, one line of thinking argues that forestry intensification could allow satisfying global timber needs from limited areas of high-yielding tree plantations, thus saving the remaining forests from exploitation pressure (Sedjo and Botkin, 1997). In reality, although forest plantations can expand on former agricultural land (Sedjo and Botkin, 1997), they often compete for space with natural forests and drive deforestation, as shown in studies in Vietnam, Chile and New Zealand (Meyfroidt and Lambin, 2008, Echeverria et al., 2006, Ewers et al., 2006). Overall, over the coming decades, a decrease in the availability of productive land and competition with other land uses will make a global forest transition difficult to achieve (see Tables 1 and 2).

4.2. Approaches

This section will discuss the three major approaches presented in Table 3, namely (i) increasing the supply of land-based products while decreasing environmental impacts; (ii) controlling expansion over natural ecosystems; and (iii) reducing and modifying the demand.

For the first approach, we will discuss here only wood products. In 2005, global consumption of roundwood was around 3,676 million cubic meters (Mm^3); of this, 1,400 Mm^3 were sourced from planted forests and about 2,276 Mm^3 from natural forests (Table 4). Realistic projections of the total demand for roundwood in 2030 range from 3,780 to 5,160 Mm^3 , with 1,880–2,560 Mm^3 for industrial roundwood and the rest for fuelwood. The exact figures will depend on population, consumption, energy prices, efficiency of processing technologies, and substitution by other materials. On the supply side, innovations and policies might contribute to, first, increasing production and productivity from tree plantations, while minimizing their negative social and ecological impacts. This includes increasing both areas and yields of plantations. Between 1990 and 2010, the area of planted forest increased on average by 4.6 Mha per year (FAO 2010). This rate of expansion is likely to decrease in the future given the growing competition for productive land, conflicts surrounding large plantation estates for social and environmental motives, and the decline of subsidies for plantations (Bull et al., 2006, Carle and Holmgren, 2008). However, international or national climate policies, including payments for carbon sequestration by afforestation or reforestation (as in Kyoto Protocol's Clean Development Mechanism), could stimulate the expansion of plantations in the future. Balanced forecasts thus assume that planted forests could expand by 56–109 Mha between 2000 and 2030, or 1.9–3.6 Mha per year (Table 2). According to an optimistic scenario, the aggregated productivity of plantations could grow by 0.58% per year through genetic enhancement and improved management, including fertilization and chemical and mechanical efforts to control competing vegetation. This would increase the supply of roundwood from plantations to 1,589–2,145 Mm^3 per year by 2030. Combining, on the one hand, the low scenarios of consumption and supply from plantations and, on the other hand, the high scenarios, natural forests could therefore supply 2,191–3,015 Mm^3 of roundwood by 2030, thus a higher figure than the volume of roundwood extracted from natural forests in 2005. Increasing output from plantations can thus contribute but not be sufficient to relieve pressure on natural forests, and only if negative impacts are controlled, among other the frequent competition between plantations and natural forests (Meyfroidt and Lambin, 2011). Thus, the second approach would be to expand the area of natural

forests managed sustainably. Sustainable forest management (SFM) corresponds to a range of practices in terms of rotation periods, harvest rates and forms of logging, including for example the currently expanding practices of reduced-impact logging (RIL) (Putz et al., 2008) and retention forestry (Gustaffson et al., 2012). Adoption of SFM practices is slow owing to a lack of specific silvicultural knowledge, inadequate legal frameworks, varying criteria, and varying profitability depending on place (Putz et al., 2008, Nasi and Frost, 2009). Overall, even with increased output from plantations, natural forests will still remain an important source of supply for premium hardwood. Assuming a constant proportion of the total industrial roundwood, high-grade tropical hardwoods consumption could correspond to 119 Mm³ in 2030. Given the recent and expected rates of adoption of SFM in tropical hardwood forestry, to meet this demand for high-grade tropical hardwoods, sustainable forest management would need to be complemented with specific efforts for hardwood plantations (e.g. teak) in the Tropics. To sustain efforts to expand SFM in both natural forests and plantations in the Tropics, certification schemes need to be tailored for natural forests in tropical / developing countries and for smallholders, e.g. as in group certification in Vietnam (Auer, 2012). Trade policies such as the Forest Law Enforcement, Governance and Trade scheme from the European Union and the amended Lacey Act in the United States are useful tools to reduce incentives for illegal logging, a major cause of unsustainable management of natural forests (Nasi and Frost, 2009). But given that an increasing proportion of wood production in developing countries is not exported towards markets in the North, complementary strategies are needed for domestic and intraregional markets (Robiglio et al., 2012). Further down the processing chain, increased efficiency in processing wood and increased rates of recycling and re-use can contribute to reduce the effective demand in forest products. For example, China has made notable efforts to increase efficiency in wood use over the recent decades. Emulation on global scale of China's resource productivity would represent a 16-25% of resource savings, or 304-640 Mm³/y (Ajani, 2011). In addition to measures to reduce pressure on forests, supporting natural regeneration through land zoning, forest extraction regulations, and plantations on degraded land might contribute to sustainable and socially desirable forest transitions.

Table 4: Balance of consumption and supply sources in the global forestry sector, 2005 and forecasts for 2030.

Global roundwood consumption (Mm ³)	2005	2030
Total	~3,676	3,780–5,160
From plantations	1,4	1,589–2,145
From natural forests	2,276	2,171–3,015
Industrial	600	540–696
Tropical hardwoods	~90	119
from certified in the tropics	26	50–62
from certified elsewhere	190	350–362
Fuelwood	1,676	1,652–2,319

Notes: adapted from Meyfroidt and Lambin (2011). Sources: Nilsson, 2007, Smeets et al., 2007, Carle and Holmgren, 2008, FAO, 2010.

Second, reducing deforestation requires controlling the expansion of competing land uses, in particular agriculture, and also urban expansion in some cases. Two possible ways are, first, promoting nature-friendly farming in areas with biophysical and social conditions unsuitable for large-scale intensive farming; and second, sparing land for forests through agricultural intensification combined with land zoning in high-potential agricultural areas.

Contracting or stabilizing global croplands and grazing areas, e.g., by concentrating them on the most productive lands, can facilitate reforestation. To ensure that the benefits for nature occur, sustainable intensification requires to reduce the negative impacts of agriculture – i.e., pollution -, and increase the efficiency of resource use – especially water, inputs, and fossil fuels (Foley et al., 2011). Although these two approaches are often presented as opposite, evidence suggests that, in reality, their combination might be the most effective (Fischer et al., 2008, Lindenmayer and Cunningham, 2012). In addition to these two approaches, supporting the off-farm economy, especially in the most marginal rural areas, can contribute to reduce the dependency on local natural resources. In cases where local extraction of forest products causes excessive pressure on local resources, diversification into nonfarm activities may divert some labor from those extractive activities and thus have beneficial effects on forest state (le Polain de Waroux and Chiche, forthcoming).

Third, the demand side needs also to be addressed. The land-sparing benefits of forestry and agricultural intensification are partially countervailed by a rebound effect (Lambin and Meyfroidt, 2011): As production efficiency increases, prices of the good decrease, which can increase either the demand for this product if it is elastic to prices or the demand for other goods through substitution of spending. Although the demand for staple crops for human consumption is relatively inelastic, the global demands for biofuels, meat, and luxury goods, such as coffee or exotic timber, are elastic. Furthermore, the growth of the off-farm economy and out-migration from rural areas do not necessarily result in land abandonment, as extensive activities, such as cattle ranching, may replace the labor-intensive, smallholder land uses. At the global scale, urbanization and rising incomes increase the demand for food and wood products, potentially contributing to further forest clearing. Agricultural intensification and out-migration are thus unlikely to reduce the overall demand for agricultural land unless combined with policies to control rebound effects, e.g., by land-use zoning and demand-side interventions. These demand-side interventions include promoting the reduction of wastes, the modification of diets and consumption patterns to reduce the demand for the most land-demanding products, in particular meat (Godfray et al., 2010, Foley et al., 2011). Ecoconsumerism and a new corporate environmentalism could accelerate a transition in production systems and orient consumption toward less land demanding products. Addressing final consumption is needed to control for displacement and rebound effects (Meyfroidt et al., 2010, Lambin and Meyfroidt, 2011), and future global demand for wood and agricultural products is a critical aspect for any potential global forest transition. In addition, across all these approaches, for the poorest fraction of humanity, the issues of equity, and access and sharing of food and land resources are crucial to ensure food security (Godfray et al., 2010).

4.3. Tools

As already shown, the approaches described above may rely on various tools, depending on the contexts: (i) state-level command-and-control, regulatory tools including land zoning, forestry regulations and their enforcement, regulations in agriculture e.g. in terms of inputs and outputs; (ii) rural and agricultural development policies, including support for agricultural intensification and off-farm economy, extension services, education, family planning...; and (iii) emerging market-based instruments, including eco-certification and other forms of corporate sustainable sourcing strategies, industry roundtables and working groups around specific commodities, moratoria, payments for ecosystem services, NGO campaigns (Table 3).

Some of these tools are discussed here. A common instrument to protect the remnants of intact forests or foster nature recovery is the establishment of protected areas (PAs) – including national parks, wilderness areas, community conserved areas, nature reserves – where human activities are restricted through a set of rules or land-use policies. Yet, the

establishment of PA can cause a spillover of deforestation to adjacent unprotected areas – so called leakage. Such leakage can occur over short distances (neighborhood or local leakage), for example by pre-emptive clearing, relocations, immigration and development along PA boundaries (Armsworth et al., 2006; Oliviera et al., 2007), and/or over long distances, for examples when higher harvest rates occur in the wider landscape to compensate for lower rates within PAs, or when 'transnational leakage' results of the strengthening of forestry law and policies in another country (Gan and MacCarl, 2007). Studies show variable amounts of local leakage (Lambin and Meyfroidt, 2011, Atmadja and Verchot, 2012), but the contextual factors that influence this remain unclear. Several strategies to address local leakage include selecting sites with low leakage potential, designing conservation projects which also provide other economic opportunities for local population, including leakage in the contracts, and other (Atmadja and Verchot, 2012). Furthermore, a general pattern has been highlighted, especially throughout the tropics, in which the less accessible forest areas, i.e. on steeper slopes, at higher elevation, further away from roads and logging roads, are the most likely to be placed under protection while lowland areas, where biological diversity is generally the highest, are preferentially left unprotected relative to highland areas (Gaveau et al., 2009, Joppa and Pfaff, 2009). This may reduce the effective impact of protected areas (Joppa and Pfaff, 2010), and creates a landscape of isolated habitat remnants embedded in a more impacted matrix (DeFries et al., 2005). Leakage can further reinforce this latter trend (Ewers & Rodrigues, 2008). To reconcile the conservation objectives of PAs with local development goals, Community-based Natural Resource Management (CBNRM) has also been extensively promoted in recent years. However, evidence about its effectiveness is mixed, and rely on insufficient data especially the reconciliation of social and environmental goals (Kellert et al., 2000, Blaikie, 2006).

Several countries have pursued traditional command and control policies, such as land use zoning or harvest regulations, to protect and restore their forests and other valuable ecosystems, and have emphasized greater enforcement of, and compliance with existing regulations (see section 3). With globalization, markets and private decisions have an increasing influence on land use, opening opportunities for a number of emerging market-based instruments. The final consumers of agricultural and wood commodities, the corporations involved in their transformation and retailing, and civil society show a growing concern for sustainability (Dauvergne and Lister, 2012). These actors are starting to express a preference for goods whose supply chain has been certified as meeting sustainability criteria. Simultaneously, large agri-business corporations increasingly adopt sustainability standards and apply these to their suppliers. Such quality or sustainability standards, and the associated premiums for farmers, have been shown to influence land use decisions in the Colombian coffee landscapes (Rueda and Lambin, 2012). But it remains to be seen to what extent these instruments can be used to promote sustainable land uses.

4.4. Case studies

Evidence about the actual effectiveness of the various tools on land use "on the ground" remains insufficient. Furthermore, the high local contextual variability in causes of land use changes calls for tailoring these general policy approaches and tools to specific contexts, rather than applying "one-size-fits-all" approaches.

In the Central Highlands of Vietnam, deforestation was mainly caused by shifting cultivation by marginalized local ethnic groups, themselves being pushed by expansion of coffee and other market crops over their agricultural lands (Meyfroidt et al., forthcoming). Policies that may have an impact on deforestation are those that would promote inclusion of the ethnic minorities into the socio-economic, political and agricultural markets spheres, intensify staple crops, strengthen and clarify land use zoning to preserve the remaining forests

of value and identify forested land with the lowest tradeoffs between environmental services and agricultural potential (Meyfroidt et al., forthcoming). Certification of coffee production for environmental and/or social standards might allow farmers to benefit from more stable prices (Rueda and Lambin, 2012), constituting a useful way to counterbalance the fluctuating prices of coffee and their harmful effects on livelihoods. But the very intensive coffee cultivation system predominant in Vietnam, with sun-grown Robusta, important fertilizers inputs and irrigation, makes it difficult for smallholders to comply with most certification standards. Large-scale certification of Vietnamese coffee thus presents serious challenges.

In a study area in the dry argan woodlands of Southwest Morocco, forest degradation was shown to be related to increasing drought and fuelwood extraction (le Polain de Waroux and Lambin, 2012). Policies for curbing deforestation would include securing tenure rights for local users, improving non-wood fuel availability and affordability, creating incentives for local tree-based afforestation, and clarifying land zoning in areas eligible for the expansion of intensive irrigated agriculture (le Polain de Waroux and Lambin, 2012; le Polain de Waroux and Chiche, forthcoming).

In the Congo Basin, important reforms have been undertaken during the past few years by national governments to regulate access to forest resources (Karsenty, 2005). Cameroon, which is often perceived as a pioneer in forest management in Central Africa, has redefined the legal frame of forest areas in 1994. This new frame includes a zoning of forested lands into units characterized by different land-use restrictions, and grouped in two overarching categories: the permanent forest estate (PFE) and the non-permanent forest estate (NPFE). NPFE is the land that may be converted to non-forest uses. The PFE cannot be converted to non-forest, and is mainly dedicated to timber production through forest management units, which are managed according to an approved management plan expected to ensure SFM (Cerutti et al., 2008) about 3.5 million hectares (60%). Initial results in a study area in the humid forest zone in Southern Cameroon indicate that deforestation rates in the permanent forest estate are low if not absent. Yet, significant disparities are observed among land zoning units. Indeed, with deficiencies in the forest legislation and lack of enforcement by the State, the effectiveness of the land use zoning is highly dependent on the willingness of logging companies to adopt SFM practices and to prohibit agriculture on the ground (Cerutti et al., 2008; Lescuyer et al., 2012) about 3.5 million hectares (60%). This behavior is guided among other by market-based instruments. For instance, forest management units under FSC certification adopt more sustainable timber harvesting, partially addressing legislation gaps (Cerutti et al., 2011). Further studies should be conducted to test for local displacement in the NPFE, which still includes large land tracts available for agriculture.

In Bhutan, a Community Forest Program was introduced in the 1980s with the primary objectives to improve local forest conditions whilst enhancing socio-economic benefits to the local communities in terms of increased access to timber, fuelwood, fodder and non-wood forest products. There was only one Community Forest unit (CF) until 2001, but the number of CFs has increased rapidly from 2007 to reach 173 in 2009. Now, CF has a well-identified place in the country's key planning instruments and mechanisms with strategic links to: (i) governance of renewable natural resources; (ii) decentralization and devolution; (iii) commercial harvesting of NWFPs, and (iv) poverty reduction (RGoB, 2010). Yet, the effects of these schemes remain unclear, owing to insufficient empirical studies.

5. Conclusion

Across the world, recovery of tree cover has occurred with many variations of patterns and processes. Although broad patterns and lessons can be derived from the study of forest transitions, such a transition is not a deterministic pathway but an abstraction of reality that is

contingent and only occurs under certain conditions. Furthermore, policies supporting forest conservation, afforestation and reforestation should take into account the displacement of land use through trade, and should not assume that reforestation will lead indiscriminately to environmental gains. Several emerging trends, including current international negotiations on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+) and other market-based approaches could provide a political momentum for reducing deforestation and promoting desirable forest transitions. Given an increased competition for productive land between different land uses, a global restoration of forests will require major policy and technological innovations as well as modifications in demands for fiber, fuel, and food. These changes cannot be taken for granted. The following factors hold the potential to significantly affect the supply of and demand for wood and agricultural products, and therefore contribute to control deforestation by addressing its drivers: (i) technological innovations and more efficient land-use practices to intensify agricultural and forestry production and reduce its environmental impacts; (ii) sound land management policies a.o. to control for rebound-effects; and (iii) changes in consumption patterns especially reduction of wastes and decreasing demand of the most land-demanding products – e.g. meat. Case studies highlight the high contextual variability in causes of deforestation and in the appropriate ways to apply the above-described general policy responses.

Bibliography

- Ajani, J. (2011). The global wood market, wood resource productivity and price trends: an examination with special attention to China. *Environmental Conservation* 38(1): 53–63.
- Angelsen, A. (2010). Policies for reduced deforestation and their impact on agricultural production. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107: 19639–19644.
- Anseeuw, W., Boche, M., Brey, T., Giger, M., Lay, J., Messerli, P., Nolte, K. (2012). Transnational Land Deals for Agriculture in the Global South. Analytical Report based on the Land Matrix Database. CDE/CIRAD/GIGA, Bern/Montpellier/Hamburg.
- Armsworth, P.R., Daily, G.C., Kareiva, P., Sanchirico, J.N. (2006). Land market feedbacks can undermine biodiversity conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103(14): 5403-5408.
- Atmadja, S., Verchot, L. (2012). A review of the state of research, policies and strategies in addressing leakage from reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+). *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17:311–336.
- Auer, M.R. (2012). Group Forest Certification for Smallholders in Vietnam: An Early Test and Future Prospects. *Human Ecology* 40(1): 5-14.
- Blaikie, P. (2006). Is small really beautiful? Community-based natural resource management in Malawi and Botswana. *World Development* 34(11): 1942-1957.
- Boucher, D., Elias, P., Lininger, K., May-Tobin, C., Roquemore, S., Saxon, E. (2011). The root of the problem: what's driving tropical deforestation today? Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA.
- Bull, G.Q., Bazett, M., Schwab, O., Nilsson, S., White, A., Maginnis, S. (2006). Industrial forest plantation subsidies: impacts and implications. *Forest Policy and Economics* 9:13–31.
- Carle, J., Holmgren, P. (2008). Wood from planted forests: a global outlook 2005–2030. *Forest Products Journal* 58: 6–18.
- Cerutti, P.O., Nasi, R., Tacconi, L. (2008). Sustainable forest management in Cameroon needs more than approved forest management plans. *Ecology and Society* 13(2). p.36.
- Cerutti, P.O., Tacconi, L., Nasi, R., Lescuyer, G. (2011). Legal vs. certified timber: Preliminary impacts of forest certification in Cameroon. *Forest Policy and Economics* 13: 184-190.
- Chazdon, R.L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science* 320: 1458–1460.
- Dauvergne, P., Lister, J. (2012). Big brand sustainability: Governance prospects and environmental limits. *Global Environmental Change* 22: 36-45.
- DeFries, R., Hansen, A., Newton, A.C., Hansen, M.C. (2005). Increasing isolation of protected areas in tropical forests over the past twenty years. *Ecological Applications* 15(1): 19-26.
- DeFries, R.S., Rudel, T.K., Uriarte, M., Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geosciences* 3: 178–181.
- Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J.M., Lara, A., Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation* 130: 481–494.
- Ewers, R, Rodrigues, A.S.L. (2008). Estimates of reserve effectiveness are confounded by leakage. *Trends in Ecology and Evolution* 23(3): 113-116.

- Ewers, R.M., Kliskey, A.D., Walker, S., Rutledge, D., Harding, J.S., Didham, R.K. (2006). Past and future trajectories of forest loss in New Zealand. *Biological Conservation* 133: 312–325.
- FAO (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010*. Rome: FAO
- Fischer, J., Brosi, B., Daily, G.C., et al. (2008). Should agricultural policies encourage land sparing or wildlife-friendly farming? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6: 380–385.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A. et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337–342.
- Gan, J., McCarl, B. (2007). Measuring transnational leakage of forest conservation. *Ecological Economics* 64: 423–437.
- Gardner, T.A., Barlow, J., Chazdon, R., Ewers, R.M., Harvey, C.A., Peres, C.A., Sodhi, N.S. (2009). Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters*, 12: 561–582.
- Gaveau, D.L.A., Epting, J., Owe, L., Linkie, M., Kumara, I., Kanninen, M., Leader-Williams, N. (2009). Evaluating whether protected areas reduce tropical deforestation in Sumatra. *Journal of Biogeography* 36: 2165–2175.
- Gibbs, H.K., Ruesch, A.S., Achard, F., Clayton, M.K., Holmgren, P., Ramankutty, N., Foley, J.A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107: 16732–16737.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327: 812–818.
- Grainger, A. (2008). Uncertainty in the construction of global knowledge on tropical forests. *Progress in Physical Geography* 34: 811–844.
- Gustafsson, L., Baker, S.C., Bauhus, J., et al. (2012). Retention Forestry to Maintain Multifunctional Forests: A World Perspective. *BioScience* 62:633–645.
- Hall, J.M, Van Holt, T., Daniels, A.E., Balthazar, V., Lambin, E.F. (2012). Trade-offs between tree cover, carbon storage and floristic biodiversity in reforesting landscapes, *Landscape Ecology*, in press.
- Joppa, L.N., Pfaff, A. (2009). High and Far: Biases in the Location of Protected Areas. *PLoS ONE* 4(12): e8273. doi:10.1371/journal.pone.0008273
- Joppa, L.N., Pfaff, A. (2011). Global Protected Area Impacts. *Proceedings Of The Royal Society B* 278: 1633–1638.
- Karsenty, A. (2005). Les enjeux des réformes dans le secteur forestier en Afrique centrale. In : Froger G (Ed). *Quel développement durable pour les pays en voie de développement?* Cahier du GEMDEV n°30. pp. 219-239.
- Kellert, S.R., Mehta, J.N., Ebbin, S.A., Lichtenfeld, L.L. (2000). Community natural resource management: promise, rhetoric, and reality. *Society and Natural Resources* 13: 705–715.
- Lamb, D., Erskine, P.D., Parrotta, J.A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* 310: 1628–1632.
- Lambin, E.F., Gibbs, H., Ferraira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., Morton, D., Rudel, T.K., Gasparri, I., Munger, J. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. Forthcoming.
- Lambin, E.F., Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: socio-ecological feedback versus socio-

economic change. *Land Use Policy* 27: 108–118.

- Lambin, E.F., Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108: 3465–3472.
- Lambin, E.F., Meyfroidt, P. (2012). Global land use competition. Unpublished manuscript prepared for the Strüngmann Forum: Rethinking Global Land Use in an Urban Era.
- le Polain de Waroux, Y., Chiche, J. (forthcoming). Market integration, livelihood transitions and environmental change in ecologically marginal areas: a case study from Morocco. *Human Ecology*.
- Le Polain de Waroux, Y., Lambin, E.F. (2012). Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands : The case of the argan woodlands (Morocco). *Applied Geography* 32:777–786.
- Le Polain de Waroux, Y., Lambin, E.F. (2012). Niche commodities and rural poverty alleviation: Contextualizing the contribution of argan oil to rural livelihoods in Morocco. *Annals of the Association of American Geographers*, in press.
- Lescuyer, G., Assembe Mvondo, S., Essoungou, J.N., Toison, V., Trébuchon, J.-F., Fauvet, N. (2012). Logging concessions and local livelihoods in Cameroon: from indifference to alliance? *Ecology and Society* 17(1). 7.
- Lindenmayer, D.B., Cunningham, S.A. (2012). Six principles for managing forests as ecologically sustainable ecosystems. *Landscape Ecology*, in press.
- Mather, A.S., Needle, C.L. (1998). The forest transition: A theoretical basis. *Area* 30: 117–124.
- Meyfroidt, P., Lambin, E.F. (2008). Forest transition in Vietnam and its environmental impacts. *Global Change Biology* 14: 1319–1336.
- Meyfroidt, P., Lambin, E.F. (2009). Forest transition in Vietnam and displacement of deforestation abroad. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106: 16139–16144.
- Meyfroidt, P., Lambin, E.F. (2011). Global forest transition: Prospects for an end to deforestation. *Annual Review of Environment and Resources* 36: 343–371.
- Meyfroidt, P., Phuong, V.T., Anh, H.V. Trajectories of deforestation, coffee expansion and displacement of shifting cultivation in the Central Highlands of Vietnam. *Forthcoming*.
- Meyfroidt, P., Rudel, T.K., Lambin, E.F. (2010). Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 107: 20917–20922.
- Meyfroidt, P., van Noordwijk, M., Minang, P.A., Dewi, S., Lambin, E.F. (2011). Drivers and consequences of tropical forest transitions: options to bypass land degradation? *ASB Policy Brief 25*. ASB Partnership for the Tropical Forest Margins, Nairobi, Kenya.
- Nasi, R., Frost, P.G.H. (2009). Sustainable forest management in the tropics: Is everything in order but the patient still dying? *Ecology and Society* 14:40.
- Nilsson, S. (2007). *The Boomerang—When Will the Global Forest Sector Reallocate from the South to the North?* Laxenburg, Austria/Washington, DC: International Institute for Applied Systems Analysis/Rights and Resources Initiative.
- Oliveira, P.J.C., Asner, G.P., Knapp, D.E., Almeyda, A., Galván-Gildemeister, R., Keene, S., Raybin, R.F., Smith, R.C. (2007). Land-use allocation protects the Peruvian Amazon. *Science* 317: 1233–1236.
- Putz, F.E., Sist, P., Fredericksen, T., Dykstra, D. (2008). Reduced-impact logging: challenges

and opportunities. *Forest Ecology and Management* 256:1427–1433.

- Robiglio, V., Lescuyer, G., Cerutti, P.O. (2012). From Farmers to Loggers: The Role of Shifting Cultivation Landscapes in Timber Production in Cameroon. *Smallscale Forestry*, in press.
- Rudel, T.K., Coomes, O.T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J., Lambin, E. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change* 15: 23–31.
- Rueda, X., Lambin, E.F. (2012). Linking globalization to local land uses: How eco-consumers and gourmards are changing the Colombian coffee landscapes. *World Development*, in press.
- Sedjo, R.A., Botkin, D. (1997). Using forest plantations to spare natural forests. *Environment* 39:15–20.
- Smeets, E.M.W., Faaij, A.P.C. (2007). Bioenergy potentials from forestry in 2050: an assessment of the drivers that determine the potentials. *Climatic Change* 81:353–90.
- World Bank (2010). *Rising global interest in farmland: Can it yield sustainable and equitable benefits?* The World Bank, Washington, DC.

A metrics for the sustainability value of steel



Jean-Sebastien THOMAS, A CARVALLO, JP BIRAT

ArcelorMittal Global R&D
Voie Romaine
57283 Maizières les Metz, France
jean-sebastien.thomas@arcelormittal.com

Introduction

Sous la pression des traités internationaux et des politiques environnementales, notamment en Europe, la gestion des risques liés aux sites industriels, et en particulier les risques environnementaux, a fait des progrès substantiels. A titre d'exemple, le traité de Montréal de septembre 1987 a permis en dix ans de diminuer par 10 la production de gaz CFC (ChloroFluoroCarbone) dans les pays européens. Cependant, le second rapport du Club de Rome [1], ainsi que plus récemment les rapports du GIEC [2] et les objectifs du millénaire pour le développement [3] ont accéléré la prise de conscience récente que l'empreinte écologique de la planète a dépassé sa surface réelle [4] et qu'elle subit la pression de la croissance démographique, qui devrait aboutir à une population mondiale de 9 milliards en 2050. Les menaces sont à la fois environnementales (réchauffement climatique, pollution des eaux, crise de la biodiversité, raréfaction des ressources naturelles, etc.), mais aussi sociales (pauvreté, accès à l'éducation, en particulier des femmes, déplacement de populations, alimentation). Cette évolution a deux conséquences. La première est que l'effort pour diminuer les impacts environnementaux ne porte plus uniquement sur les sites de production mais sur l'ensemble du cycle de vie des produits, des services, des biens intermédiaires, voire des technologies. L'Analyse du Cycle de Vie est un des outils qui permet de faire cette évaluation. La deuxième est que l'on doit compléter ces analyses par des indicateurs sociaux et économiques pour prendre en compte l'ensemble des aspects du développement durable. A titre d'exemple, l'Europe intègre effectivement cette approche à travers sa stratégie Europe 2020 qui ambitionne de mettre en œuvre une croissance intelligente, durable et inclusive [5].

Les choix des décideurs aujourd'hui, et dans les 10 ans à venir, vont dessiner les contours de la société de demain. Ils vont également identifier les problèmes auxquels les futures générations devront faire face. Aussi est-il très important d'éclairer ces décideurs avec des indicateurs reflétant les impacts sociaux, économiques ou environnementaux de leurs décisions.

L'objectif de cet article est de porter un regard critique sur les approches permettant de mesurer l'empreinte environnementale d'abord, puis sociale ensuite, et de voir comment l'industrie sidérurgique et notamment le matériau acier essaient de se positionner sur ces deux critères. La dimension économique ne sera pas abordée dans cet article.

La première partie de cet article va donc être consacrée à la mesure de l'empreinte environnementale des produits. Un examen critique de l'analyse du cycle de vie (ACV), l'outil privilégié aujourd'hui pour quantifier cette mesure, sera proposé. Il permettra de comprendre les forces et faiblesses de cet outil et ses besoins en développement. Cette partie analysera aussi comment l'industrie sidérurgique s'organise pour tenter de faire face aux contraintes environnementales du futur.

La deuxième partie portera sur le volet social ou sociétal, qui est souvent négligé dans les débats du fait de la difficulté rencontrée à mesurer son impact. Ce volet englobe en effet

l'engagement des acteurs autour des sites de production, la gestion des ressources humaines (RH) de l'entreprise, la gestion de la santé et de la sécurité, mais aussi la valeur sociale d'un produit (et donc des matériaux qui le constituent). L'Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV), qui marque les prémices d'une empreinte sociale du cycle de vie, y sera brièvement présentée. De même, bien qu'elles soient encore à un stade de développement, deux autres approches sociétales seront analysées avec leur application à l'industrie sidérurgique. La première est inspirée des indicateurs de bien-être développés par l'OCDE, et la deuxième concerne le nouveau modèle d'affaire inclusif appelé 'business at the Base Of the Pyramid' (BOP) et visant à soutenir la croissance durable des populations à faible revenus. Selon C.K. Prahalad [43], la base de la pyramide représente les 4 milliards de personnes dont le revenu en parité de pouvoir d'achat est inférieur à 1,500US\$ par an¹.

La dernière partie de l'article présente l'initiative Sovamat qui signifie « SOcial VALue of MATerials ». Cette initiative, initiée par ArcelorMittal, vise justement à identifier le rôle des matériaux dans la société et à appliquer et améliorer les méthodes existantes pour mesurer le caractère durable de ces matériaux.

L'empreinte environnementale, sa mesure, et ses limites

En matière d'environnement, depuis les années 70, des progrès conséquents ont été réalisés au niveau des sites de production d'acier. Ces progrès ont touché notamment la réduction de la consommation énergétique, et par conséquent celle des émissions de CO₂, à hauteur de près de 50% entre 1975 et 2005 pour la sidérurgie Nord-Américaine, Japonaise et Européenne, comme le montre la Figure 1. Ces dernières années, la crise a quelque peu bouleversé les statistiques, car un certain nombre d'usines n'ont pas fonctionné à plein régime. Il est probable que certains impacts, ramenés à la tonne d'acier produite, ont légèrement progressé, alors que les émissions globales ont diminué, comme les émissions de CO₂.

Les progrès ont également touché la mise en œuvre sur une large majorité de sites de systèmes de management environnementaux (SME). En 2009, au niveau mondial, le pourcentage de sites de production d'ArcelorMittal certifiés ISO 14001 était de 93%. Ce pourcentage est passé à 98% en 2011 [6].

Il reste néanmoins vrai que des efforts restent à faire pour diminuer les consommations d'énergie, les consommations d'eau, les émissions de CO₂, ainsi que les autres émissions dans le milieu naturel qui peuvent avoir un effet sur la qualité de l'air, de l'eau ou sur la biodiversité.

¹ Pour information, le WRI [30] définit ce montant à 3,000 US\$ par an en pouvoir d'achat local. Ce n'est pas l'objet de l'article de discuter ces nombres.

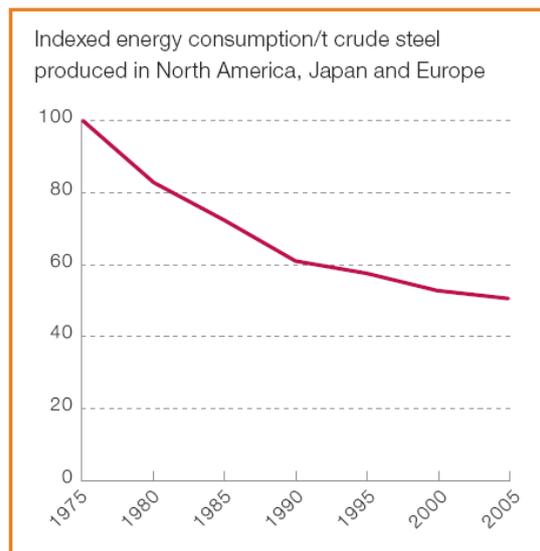


Figure 1: Diminution de la consommation d'énergie primaire de la sidérurgie nord-Américaine, japonaise et européenne [41]

L'acier a une autre caractéristique particulière qui lui permet de faire bénéficier les produits de gains environnementaux conséquents tout au long de leur cycle de vie: c'est en effet un matériau très fortement recyclé. En effet, le recyclage des ferrailles après usage de l'acier est facilité par plusieurs phénomènes:

- × Les ferrailles sont faciles à collecter et à trier en raison de leurs propriétés magnétiques
- × Les ferrailles ont une valeur économique certaine
- × Les ferrailles répondent à des critères de qualité stricts
- × Indépendamment de leur origine, les ferrailles sont recyclables indifféremment dans toutes les gammes d'applications acier. Il s'agit d'un recyclage matière à matière et non pas produit à produit.
- × La sidérurgie dispose de filières «courtes», les usines d'aciéries électriques, pour utiliser la ferraille comme matière première.

Tous ces facteurs expliquent que l'acier est recyclé à un taux qui se situe entre 80 et 90% en moyenne. Le cycle de l'acier est un cycle global, de matériau à matériau, dont l'économie circulaire est depuis longtemps autorégulée par les marchés, qui définissent les prix de l'acier autant que des ferrailles. La matière première secondaire est d'ailleurs en concurrence de façon subtile avec la matière première primaire, le minerai de fer.

Par ailleurs, il semble important d'insister sur le fait que les ferrailles sont recyclables un nombre indéfini de fois. Ainsi, considérons une tonne d'acier produite initialement, puis recyclée à 90% à la fin de vie de son premier usage. Les 900 kg de ferraille qui en résultent vont à leur tour devenir de l'acier grâce au four électrique, acier qui servira à un second usage. Si on poursuit cette boucle de façon infinie, et que l'on additionne les différentes quantités d'acier effectivement utilisées durant chaque cycle, on arrive à une somme totale de 10 tonnes pour un taux de recyclage moyen de 90% (Figure 2). Ainsi, toute tonne d'acier produite aujourd'hui sera remise à la disposition des générations futures, dans des délais qui dépendent du type d'usage (10 à 12 ans pour les voitures, 6 mois à 2 ans pour l'emballage, 50 ans pour certaines constructions, etc.).

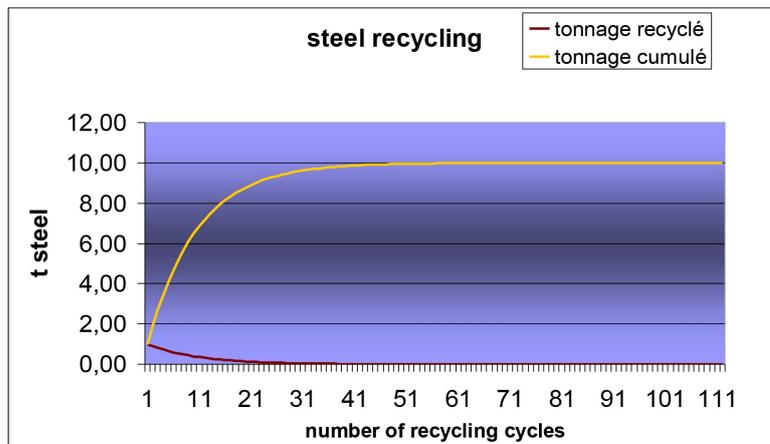
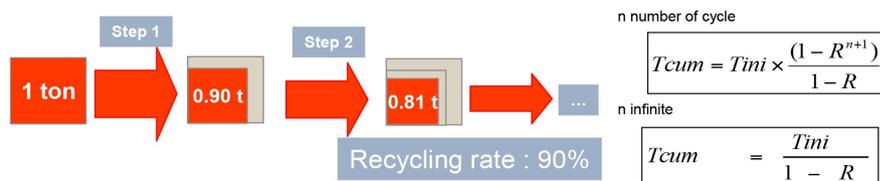


Figure 2: le recyclage indéfini de l'acier permet l'usage de 10 tonnes à partir d'une tonne produite par un haut-fourneau

Pourquoi ces caractéristiques de recyclage sont-elles importantes pour l'environnement ? Bien que pour les matériaux principaux comme l'acier, le verre, ou le ciment, il n'y ait pas fondamentalement de problème de ressources² [24, 7], il est fort probable que dans le futur, les matières premières vont devenir de plus en plus précieuses et chères. Ce constat ne fera qu'augmenter la pression ressentie aujourd'hui pour réutiliser et recycler davantage les matières secondaires. En Europe, cette tendance s'est traduite par des réglementations comme la directive cadre déchet [8], mais aussi par la 'flagship initiative' sur l'efficacité des ressources [9]. Elle est également anticipée par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) dans sa Vision 2050 [10]. Pour atteindre ce but, il faut que les méthodes d'évaluation puissent refléter les bénéfices environnementaux liés à la mise à disposition après usage de matières premières qui auront été utilisées pour construire des bâtiments, développer les infrastructures, les moyens de transport, ou conserver les biens et les denrées alimentaires.

L'Analyse du cycle de vie semble aujourd'hui un outil de plus en plus utilisé par les décideurs et notamment les pouvoirs publics. En effet, différentes démarches d'affichage environnemental des produits en Europe ont pour socle l'ACV. C'est effectivement le cas pour les normes EN15804 et 15978 [11, 12] concernant les produits de construction et élaborées dans le cadre du CEN TC350 [13], pour les guides concernant les produits de consommation élaboré par l'ADEME et l'AFNOR en France [14] ou par le JRC pour la commission Européenne [15]. L'ACV fait également partie des outils utilisés dans les démarches d'éco-conception comme le sont également par exemple les évaluations multicritères par écopoint ou écoindicateurs, ou les listes de substances. Dans le cas de l'écoconception, l'ACV est souvent considéré comme l'outil de quantification pour mesurer les progrès [16].

Née à la fin des années 70, L'ACV ne s'est vraiment démocratisée que dans les années 90, sous l'impulsion de l'UNEP/SETAC life cycle initiative. L'ACV, qui est une méthode normalisée par l'ISO depuis 2006 [17, 18], permet d'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service (ou de comparer deux d'entre eux) sur l'ensemble de leur cycle de vie, c'est-à-dire

² Pour le ciment, il y a des problèmes liés à l'ouverture des carrières mais pas de ressources disponibles. Ce n'est pas forcément le cas pour les produits pétroliers, ou des métaux rare ou précieux comme le lithium ou le platine

depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit (mise en décharge, incinération) ou son recyclage. L'évaluation porte sur les impacts environnementaux globaux, comme le changement climatique ou l'amincissement de la couche d'ozone liés à la fonction du produit (on parle d'unité fonctionnelle) [19, 20]. Sa vertu est de vérifier s'il n'y a pas de transfert de pollution, d'une étape du cycle de vie à une autre, ou d'un impact à un autre [17, 21]. Par exemple, une voiture entièrement électrique permet d'améliorer les émissions de la phase d'usage d'une voiture puisque les émissions liées à la combustion du diesel ou de l'essence n'existent plus. Cependant, d'autres émissions sont émises durant une autre phase, celle de production de l'électricité, et parfois même avec des impacts très significatifs si la source est le gaz ou le charbon.

Cependant, l'ACV a des limites qui se sont traduites dans les années 2000-2010 par une période d'élaboration de méthodes un peu divergentes de l'ACV traditionnelle, eu égard par exemple aux frontières des systèmes et aux méthodes d'allocation, à l'ACV dynamique, etc [22]. Parmi ces limites, dont certaines ont été bien analysées dans le projet européen Calcas [23], il convient de souligner:

- × Elle ne valorise pas les impacts positifs. Par exemple, elle ne prend pas en compte certains des impacts positifs comme ceux qui ont accompagné l'emballage métallique alimentaire (baisse du gaspillage, meilleure hygiène, amélioration du transport, meilleure conservation de la nourriture, etc.), ou alors l'utilité sociale et environnementale d'un pont ou d'une voie de chemin de fer (facilité de communication, gain de temps, baisse de consommation de carburants, etc.) sont des impacts positifs rarement pris en compte [24].

- × Paradoxalement, malgré son nom qui fait référence au cycle de vie, l'ACV est une méthode basée sur des modèles statiques, qui ne varient pas dans le temps et l'espace. En effet, les inventaires de cycle de vie agrègent en une seule émission les rejets d'un polluant donné sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit. De plus, le calcul des impacts agrège lui en un seul indicateur l'ensemble des polluants, émanant de divers inventaires, qui ont été émis dans des lieux et des périodes différentes. Cet aspect est considéré comme une limitation importante de l'ACV car elle réduit sa précision [25, 26]

- × Elle sait bien traiter des impacts globaux comme le potentiel de réchauffement climatique, qui sont liés à des flux d'émissions de CO₂ ou de CH₄, et dont les effets peuvent s'additionner à n'importe quel endroit du globe. A contrario, elle sait beaucoup moins bien traiter les impacts plus locaux comme la toxicité et l'écotoxicité. Ainsi les SO_x émis dans une mine du Brésil, lors de la production de minerai, puis ceux émis pendant la production d'acier en Chine puis lors de l'utilisation d'une voiture en Europe, ne s'ajoutent pas physiquement, et leur impact dépend du lieu où ils sont émis ainsi que de la qualité de l'air! De même, le phénomène d'eutrophisation ne peut se réduire à un flux de nitrates ou phosphates rejetés car il dépend fortement de la qualité et du débit du milieu récepteur (ruisseau vs fleuve vs mer). Les longs efforts de l'UNEP-SETAC pour développer une méthode consensuelle pour évaluer l'impact ecotoxicité appelée USEtox [27], mais qui reste entachée d'incertitudes, montre bien cette faiblesse ; par ailleurs, dans son récent rapport sur les méthodes de calcul des impacts environnementaux, le JRC précise que cette méthode particulière n'est pas adaptée aux métaux et aux impacts directs sur les pesticides [28].

- × L'ACV est une évaluation de type 'micro-économique' du marché des produits de consommation qui se situe au niveau du produit. Elle a du mal à évaluer les conséquences d'une agrégation de type 'macro-économique' des impacts environnementaux à une échelle supérieure, qu'elle soit régionale ou mondiale. Pour cela, des analyses de types ACV consécutives ont été développées et également testées [29, 30] Par exemple, le bois

apparaît comme une bonne solution dans un bâtiment, mais à grande échelle, si tous les bâtiments étaient en bois, la compétition d'usage avec le bois-énergie, les surfaces cultivées à vocation alimentaire, ou la préservation de la biodiversité serait susceptible de modifier significativement les conclusions! L'Analyse des Flux de Matières (AFM) fait également partie des méthodes qui permettent d'approcher ce bilan de flux et de stocks pour un matériau à une échelle plus globale [31, 32].

× Par ailleurs, il a été montré que l'ACV avait des difficultés à traiter des problèmes d'allocation des bénéfices liés aux co-produits ou sous-produits, au recyclage, à la réutilisation et à la valorisation en fin de vie. Les raisons principales sont qu'il n'y a pas de méthode satisfaisante, et que le consensus entre praticiens mais aussi commanditaires est difficile à obtenir [33, 22, 34]. A titre d'exemple, une analyse de l'influence de l'application des normes EN15804, NF P01-010 et le guide de l'Ademe/Afnor a été réalisée pour comparer l'impact environnemental de deux matériaux fictifs [35]. Cette analyse montre que les résultats pour l'impact potentiel de réchauffement climatique peuvent varier de plus de 30% selon la norme utilisée. En effet, comme expliqué dans l'article cité, chaque norme valorise de façon différente les bénéfices du recyclage. Ces bénéfices peuvent en effet être attribués soit à celui qui recycle de la matière secondaire en entrée de process, soit à celui qui en fournit en fin de vie. Ainsi, selon le contenu recyclé des matériaux et leur taux de recyclage en fin de vie, les résultats peuvent être très sensibles.

Bien que son influence s'accroisse, l'ACV ne pourra très probablement pas tout mesurer et tout résoudre. Ce serait nier la complexité réelle des systèmes, actuels et futurs, dans lesquels notre société vit. En tant qu'outil d'évaluation de l'empreinte environnementale, l'ACV semble un outil adapté et pratique. Mais il y a encore beaucoup de développements à effectuer pour qu'il puisse répondre à ces questions de façon plus juste et pertinente et jouer complètement son rôle comme outil d'éco-conception.

Éléments de mesure de la valeur sociale des matériaux

Comme souvent constaté à travers l'initiative Sovamat [24], un des aspects particulièrement délicat de la définition d'une métrique pour le développement durable est la mesure de la valeur sociale et sociétale des matériaux. Selon PWC [36], «la notion social/sociétal vise les rapports de l'entreprise avec la société civile dans son tout comme avec chacune de ses parties. Cela comprend l'ensemble des parties prenantes qui la composent ou qui l'entourent, à savoir :

- non seulement ses collaborateurs, employés ou salariés (aspect social)
- mais également toutes les autres parties prenantes avec lesquelles l'entreprise est en relation comme les collectivités publiques, associations, fournisseurs, clients, ONG, consommateurs, ... (aspect sociétal).»

Les interactions sociales et sociétales sont donc très nombreuses sur la chaîne de valeur de l'entreprise. Il est facile de comprendre que la définition d'indicateurs clairs et complets pour aider la prise de décision sur ce seul pilier du développement durable est un exercice délicat et complexe, comme l'illustre la suite de cet article.

Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV)

L'ASCV, qui a été formalisée dans le guide du Life Cycle Initiative de l'UNEP-SETAC [37], est une analyse sociale et socio-économique du cycle de vie proposant une technique

d'évaluation des impacts sociaux et socio-économiques (réels et potentiels) positifs et négatifs tout au long du cycle de vie des produits'. Elle complète l'AECV (i.e. l'ACV Environnementale) en y intégrant les aspects sociaux et socio-économiques. C'est une démarche très complexe et longue, qui demande un nombre très important d'informations. Sa mise en œuvre est encore peu répandue. Elle s'inspire bien sûr de l'Analyse de Cycle de Vie classique, en intégrant une unité fonctionnelle et les étapes classiques de la norme 14040-44.

L'ASCV est basée sur la description de la chaîne de valeur d'un produit : extraction des matières premières, conception et production, emballage et distribution, utilisation et maintenance, gestion de la fin de vie (recyclage, enfouissement, etc...). Le principe est d'associer et de cartographier à chaque étape de la chaîne de valeur les parties prenantes susceptibles de subir des impacts positifs ou négatifs. Ensuite, pour chaque étape et chaque catégorie de parties prenantes, un certain nombre de sous-catégories d'impacts sont déclinées, comme indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1: Catégories de parties prenantes et sous-catégories [37]

Catégorie de parties prenantes	Sous-catégories
«travailleurs»	Liberté d'association et de négociations collectives Travail des enfants Salaires Heures de travail Travail forcé Egalité des chances/Discrimination Santé et sécurité Avantages sociaux/Sécurité sociale
«consommateurs»	Santé et sécurité Mécanismes de rétroaction Protection de la vie privée Transparence Responsabilité en fin de vie
«communautés locales»	Accès aux ressources matérielles Accès aux ressources immatérielles Délocalisation et migration Héritage culturel Conditions de vie saines et sûres Respect des droits autochones Engagement communautaire Emploi local Conditions de vie sûres
«sociétés»	Engagement public sur les enjeux du développement durable Contribution au développement économique Prévention et médiation des conflits armés Développement technologique Corruption
Acteurs de la chaîne de valeurs n'incluant pas les consommateurs	Saine concurrence Promouvoir la responsabilité sociale Relations avec les fournisseurs Respect des droits de propriété intellectuelle

Un certain nombre d'indicateurs sont analysés avec des unités de mesure qualitatives, quantitatives ou les deux, comme indiqué à titre d'exemple dans le Tableau 2 pour la catégorie 'travailleurs'.

Tableau 2: exemple d'indicateurs pour la sphère d'influence travailleurs [38]

Sous-catégorie d'impacts	Indicateurs	Unités de mesure
Heures de travail	nombre d'heures de la semaine au travail	Nb d'heures / semaine
	temps supplémentaire rémunéré	oui/non
Salaires	comparaison du salaire d'entrée des employés à la production avec le salaire minimum local	ratio \$/heure / \$/heure

Les phases suivantes sont la collecte de données sur les indicateurs, puis l'analyse et l'interprétation des résultats.

L'ASCV en est à ses débuts, mais il semble bien que la multiplication des applications va permettre de mieux maîtriser la méthode et d'apporter des éléments concrets et opérationnels aux décideurs pour mesurer l'empreinte sociale des produits. Elle doit pour cela faire face à des difficultés majeures, qui ont été décrites dans le guide de l'UNEP-SETAC, et parmi lesquelles se trouvent :

- × la difficulté d'accéder aux données sociales (manque de base de données, données biaisées, temps et coût de la collecte...)
- × l'utilisation des données qualitatives vs quantitatives et leur agrégation ?
- × l'ignorance des chaînes causales et des effets rebonds (e.g. impact sur un acteur qui influe sur un autre acteur)
- × l'analyse des impacts sociaux des produits qui n'est pas encore abordée (ce qui est décrit dans l'article comme la valeur sociale des matériaux)
- × la communication des résultats ...

Enfin, l'impact sociétal positif ou négatif d'un bien, d'un service ou d'un matériau, ne se mesure pas nécessairement et uniquement par des indicateurs chiffrés. La sociologie, qui est la science de la société, présente beaucoup d'autres outils et méthodes plus qualitatives qui peuvent être utilisées de façon complémentaires.

Par ailleurs, il semble également difficile de ramener tous les aspects sociaux à une unité fonctionnelle comme un mètre carré de bardage ou un litre de peinture. Ainsi, tout comme l'ACV ne répond pas à tous les enjeux environnementaux, l'ASCV à ce jour ne peut pas synthétiser pour le décideur l'ensemble des enjeux sociaux du développement durable. Elle doit donc être considérée comme une méthode parmi d'autres et utilisée avec la prudence nécessaire.

Indicateurs de bien-être

Un des autres moyens d'analyser la valeur sociale des matériaux est de parler de leur contribution au bien-être de la société, démarche qui a été élaborée par l'OCDE dans son initiative « Better Life ». Une tentative d'application de cette démarche à la sidérurgie a été proposée par Carvallo et Birat [39] pour analyser comment les matériaux et la société interagissent et quels indicateurs pourraient être mis en œuvre pour mesurer le rôle joué par les matériaux pour améliorer le bien-être de la société. Les indicateurs qui ont été considérés dans cette étude sont indiqués dans le Tableau 3. L'ensemble de ces indicateurs sont analysés à l'aide des données de l'OCDE, de Worldsteel Association, ainsi que d'instituts et de divers producteurs d'acier.

Tableau 3: matrices d'indicateurs de bien-être [39]

OECD classification	OECD Well-being indicators	Steel industry level	Company level
Income and wealth	Household net adjusted disposable income per person	Global sales	Annual turn-over
	Household financial net wealth per person	Price of steel	Stock exchange value
Jobs and earnings	Employment rate	Steel productivity	Number of employees
	Long-term unemployment rate		
Housing	Number of rooms per person	Contribution of the steel industry to the residential sector	Turnover of the construction (residential) sector
	Dwelling with basic facilities		
Health status	Life expectancy at birth	Accidents rate	Fatalities
	Self reported health status		
Education	Educational attainment	Education level of employees Training hours	
Civic engagement and governance	Voter turn-out	Participation in the definition of norms	
	Consultation on rule-making	Compliance	
Environnement quality	Air pollution	Environmental emissions Energy consumption Ressource use Recycling	

A titre d'illustration, l'analyse de l'indicateur éducation est résumée ci-dessous. L'amélioration de la productivité dans l'industrie sidérurgique entraîne une évolution des compétences nécessaires pour faire tourner une usine. Ce besoin se traduit par une élévation des compétences des employés qui est facilitée par des actions de formation. Ainsi, en 2010, plus de 7% des employés d'ArcelorMittal, c'est-à-dire à peu près 18 600 personnes [40, 6], ont bénéficié d'une formation dans l'université du groupe à hauteur de 400,000 heures. Les bénéfices sont partagés par tous, salariés comme employeurs. Ces indicateurs servent aussi à mesurer les progrès faits dans des domaines où les performances ne sont pas aussi satisfaisantes, comme pour le taux de fréquence des accidents ou le nombre de décès, qui, bien que s'améliorant, restent encore trop élevés. Ainsi, cette approche nécessite encore quelques améliorations, mais pour partie, elle transparait à travers les indicateurs de performance suivis par les entreprises dans leurs rapports de responsabilité sociale. Elle représente une valeur sociétale du matériau à travers l'entreprise.

Une autre approche consiste à évaluer la valeur sociétale du matériau, à travers le produit. Bâtiments, voitures, boîtes de conserve, éoliennes, pour ne citer qu'eux, rendent des services qui sont rarement estimés dans un contexte d'évaluation des produits. Pourtant, les bâtiments abritent et protègent les ménages ; les voitures, comme tout moyen de transport, facilitent la communication et permettent les échanges de biens ; les emballages contribuent à éviter le gaspillage de la nourriture et facilitent son transport ; les éoliennes, comme toute source d'énergie, permet aux personnes de s'éclairer pour leur loisir ou leur travail, etc... L'acier permet, comme d'autres matériaux la fabrication de ces produits. Ainsi, à titre d'exemple, en 2011, la production d'acier mondiale, qui était de 1,518 Mt, a été consacrée à 51,2% à la construction [41].

Il apparaît donc que la valeur sociétale des matériaux est un champ de recherche à part entière, qui nécessiterait déjà de définir ce que valeur veut dire : il n'est en effet pas évident par exemple qu'on puisse chiffrer de façon pertinente la valeur à accorder à un bâtiment résidentiel, alors qu'un logement fait partie des besoins élémentaires de tout être humain, et qu'elle dépend bien sûr d'un grand nombre de facteurs (localisation, situation socio-

économique, etc.). Il est bien sûr important de garder à l'esprit que c'est bien l'ensemble des matériaux constituant un produit, qui peut prétendre contribuer à sa valeur sociétale.

Le business social avec la base de la pyramide

Le business social, appelé également business inclusif, peut-être défini comme la capacité à engager des populations à faibles revenus dans la chaîne de valeur des entreprises, et à développer, pour un bénéfice partagé, des produits ou services abordables qui répondent aux besoins de ces populations [42]. Ce mouvement a été accéléré par la parution du livre de C. K. Prahalad en 2004 appelé «the fortune of the bottom of the pyramid» [43]. Le principe en est simple : le potentiel du marché de la BOP qui regroupe de 4 à 5 milliards de personnes, peut-être estimé de 5,000 Mrd\$ selon le WRI [44] à 13,000 Mrd\$ selon C. K. Prahalad. Dans les chiffres proposés par le WRI, le marché de l'alimentation est de 2,900 Mrd\$, celui de l'énergie de 430 Mrd\$ et celui du logement de 330 Mrd\$. Les méthodes de calcul, qui ne seront pas discutées ici, sont bien sûr différentes, mais les ordres de grandeurs sont là.

Comme indiqué précédemment, l'Europe dans sa stratégie 2020, fait de l'éradication de la pauvreté dans le monde une priorité. Pour ce faire, il semble désormais acquis que les gouvernements seuls ne peuvent pas agir. Il est nécessaire que les entreprises ainsi que les organisations non gouvernementales s'associent et créent des partenariats avec les acteurs locaux afin de développer les conditions pour élever le niveau de vie des populations à faible revenu. Un certain nombre d'entreprises dont Danone, Unilever, Schneider, GDF Suez ou Procter&Gamble sont déjà bien avancées dans cette démarche et y voient un certain nombre d'opportunités, à savoir:

- × une source d'innovation incluant l'innovation sociale
- × une croissance dans des marchés non explorés
- × la construction ou la consolidation d'une marque à travers un rôle reconnu dans la société
- × une amélioration de l'efficacité de la chaîne de valeur de l'entreprise (approvisionnement, production, distribution ...)

Sans être à proprement parler du business inclusif, ArcelorMittal a également engagé des actions ciblées envers des populations à faible revenu dans le but de tester son potentiel dans ce secteur et de développer des solutions adaptées. Deux cas peuvent être cités qui montrent que, même s'il reste beaucoup à faire dans ce domaine, des voies existent pour le développement de nouveaux modèles :

- Au Brésil, ArcelorMittal a mis en place depuis 2004 un 'programme d'engagement des fournisseurs' concernant le développement durable et la responsabilité sociale. Ces deux dernières années, ce programme a travaillé plus étroitement avec 15 entreprises brésiliennes appartenant à sa chaîne de valeur, afin qu'elles intègrent dans leurs pratiques les normes internationales de santé, sécurité et environnement. Cet effort a permis à ces 15 entreprises de développer leur propre code d'éthique, et 11 d'entre elles ont mis en oeuvre des initiatives pour économiser de l'énergie, de l'eau et du papier. De même, ces 15 entreprises ont réalisé des progrès réels dans leur processus de production et de gestion, si bien qu'elles ont toutes gagné de nouveaux clients.

- Dans le domaine de la construction, un partenariat a été développé entre la fondation ArcelorMittal et l'organisation non gouvernementale 'Habitat for Humanity' pour créer des logements à destination des populations à faible revenu. Ce partenariat a commencé en 2008,

en Roumanie lorsque 76 logements à destination des populations à faible revenus ont été complètement rénovés suite aux dégâts provoqués par des inondations. La conception de la maison, initialement développée par Habitat for Humanity, a été transformée en un modèle de maison à structure acier légère. Ces maisons à deux étages peuvent abriter quatre familles et jouissent d'une durée de vie d'au moins 20 ans. Facilement constructibles par les bénéficiaires eux-mêmes, encadrés par l'ONG et aidés par des employés volontaires d'ArcelorMittal, elles ont été conçues pour présenter un coût abordable. Comme résultat du partenariat, un prototype appelé « Casa Buna » a été créé et l'expérience a été reproduite en Argentine, au Costa Rica, en Macédoine, au Mexique et en Afrique du Sud avec 500 familles bénéficiaires. ArcelorMittal, dans ce partenariat avec Habitat for Humanity, fournit l'acier à moindre coût pour la structure du bâtiment, son expertise dans les techniques de construction, une subvention ainsi qu'une main d'œuvre constituée de ses employés volontaires qui sont recrutés dans le cadre d'un programme global de volontariat coordonné par la fondation ArcelorMittal.

Ces exemples montrent que les entreprises, en investissant dans l'innovation, et en établissant des partenariats multi-acteurs, peuvent trouver des solutions gagnant-gagnant, à tous les stades de leur chaîne de valeur (ici, de l'approvisionnement en amont à la distribution en aval).

Ils montrent également que l'action sociale d'une entreprise industrielle ne s'arrête pas aux portes de son usine. Elle peut aider à l'émergence d'entreprises pérennes et responsables autour de ses sites de production, en particulier chez ses fournisseurs. Elle permet aussi, pour les entreprises en B2C³, de développer en partenariat des solutions directement utilisables par le client final, avec comme bénéfice pour ces entreprises un débouché intéressant, et pour les populations à faible revenus des solutions de logement, de communication ou un outil de travail à un coût abordable. Enfin, une mesure de ces solutions (le nombre de personnes logées, ou munies de moyens de communication, ou bien le chiffre d'affaire créé par une activité nouvelle) donne une bonne indication du service social rendu par un produit ou un matériau.

Cependant, il est important de considérer non seulement les bénéfices sociétaux, mais également l'empreinte environnementale de la solution proposée. En effet, les deux aspects sont également importants à prendre en compte pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'effets indésirables. Il est indispensable que les solutions offertes par exemple ne dégradent pas le bilan Gaz à Effet de Serre. Devant le grand nombre de clients potentiels parmi les populations à faible revenus, il est facile d'imaginer les effets sur le réchauffement climatique. Dans le cas de la maison Casa Buna, elle présente un bilan énergétique (besoin en énergie primaire pour le chauffage) inférieur de plus de 50% à l'appartement moyen de ville en Roumanie [45]. Par ailleurs, étant conçue en acier, la majorité des constituants du gros œuvre pourra être recyclée en fin de vie, ce qui confère au bâtiment une empreinte environnementale faible et contribue à la préservation des ressources.

L'initiative SOVAMAT (SOcial VALUE of MATerials)

Les deux parties précédentes ont permis de souligner quelques atouts et limites actuelles des méthodes et indicateurs de mesure de l'empreinte environnementale et sociétale d'un produit tout au long de son cycle de vie. Le chemin est encore long avant d'arriver à une conception durable des produits. Cependant, les fondements méthodologiques sont bien présents. Ils ont en partie été rassemblés dans le BS 8905, un cadre pour l'évaluation de

3 Business to Consumer

l'usage durable des matériaux [46], qui est structuré sur cette approche cycle de vie. L'industrie sidérurgique a essayé depuis quelques années de participer à ce débat en positionnant son matériau, l'acier, vis-à-vis des principes du développement durable, mais aussi en développant une initiative appelée SOVAMAT, dont l'objectif in fine est d'élaborer une mesure du caractère durable des matériaux.

En effet, Sovamat a été initiée en 2005 pour souligner le rôle important que jouent de façon pérenne les matériaux dans l'économie et dans l'histoire [47, 48, 49]. Cette démarche, qui est soutenue par différents secteurs de production de matériaux, est multidisciplinaire. Elle repose sur les méthodes existantes avec l'objectif de les améliorer et de les faire communiquer à travers une méthode intégrée innovante. A titre d'exemple, les principaux axes de recherche sont décrits ci-dessous:

- × Intégrer le paramètre temps afin d'évaluer les conséquences dans le futur des choix actuels. Ce travail correspond au développement des ACV dynamiques et des MFA dynamiques. Cette approche permet notamment de mieux appréhender les bénéfices du recyclage.

- × Utiliser la prospective pour décrire des scénarios d'évolution du monde à moyen et long terme. Cette étape est nécessaire à l'intégration du temps. Elle peut être organisée autour de la description des grands challenges (démographie, pauvreté, disparition des ressources naturelles, changement climatique) et des problèmes plus globaux (matériaux, énergie, eau,...)

- × Définir et formuler une valeur sociale des matériaux, afin de l'inclure dans la méthode intégrée, sous forme d'indicateurs qualitatifs comme quantitatifs. Il s'agit d'évaluer non seulement les bénéfices des produits eux-mêmes, mais aussi les impacts socio-économiques des industries.

- × Elaborer une méthode de conception durable des produits et services. C'est une voie de progrès réelle pour le volet sociétal, car beaucoup d'entreprises intègrent déjà, pour toute solution innovante développée en R&D, une démarche d'éco-conception.

- × Permettre de parler des matériaux en eux-mêmes, et pas uniquement au travers des produits dont ils sont les parties constituantes, c'est-à-dire de commodités et non plus seulement de biens de consommation, comme le fait essentiellement l'ACV. Une partie de l'économie tourne autour de ces commodités, qui en appellent d'autres comme l'énergie, et qui sont produits, arrivent en fin de vie et sont recyclés comme matériaux et non pas simplement comme des éléments de biens qui ont été utilisés et sont jetés. Ils ont en effet, pour la plupart d'entre eux, une vie qui transcende le cycle de vie et se perpétuent indéfiniment, un peu comme une métempsyose.

L'initiative Sovamat, animée par ArcelorMittal, est aujourd'hui composée d'un réseau, qui fait vivre des thèmes de recherches dynamiques dans différentes démarches comme notamment : (1) un projet européen maintenant finalisé appelé PACT [50], (2) les travaux du CIRAIIG, chaire de recherche canadienne sur les ACV [51], (3) la création d'un site web [49] et (4) l'organisation d'une conférence annuelle appelée SAM⁴ (Society And Materials). Cette dernière permet de recueillir les avancées scientifiques de différents domaines sur le thème des méthodes d'évaluation du développement durable.

Conclusion

Le développement durable est constitué de trois piliers en complète interaction. Il semble clair aujourd'hui que les grandes décisions, celles qui engagent une génération, doivent intégrer

4 La septième conférence SAM7 aura lieu à Aix la Chapelle les 25 et 26 avril 2013.

ces trois piliers. Or, si l'aspect économique semble plutôt naturel à prendre en compte, et que l'aspect environnemental, au moins en Europe, commence à devenir un critère important, certains pans de l'aspect sociétal sont parfois négligés.

La raison est simple : la mesure de ces impacts est encore en chantier. A travers l'ACV, l'empreinte environnementale des produits se met en œuvre progressivement, même si de nombreuses améliorations sont encore nécessaires pour intégrer de façon objective les défis environnementaux du futur. L'empreinte sociale ou sociétale en est à ses débuts avec des méthodes comme l'ASCV qui n'ont pas encore prouvé leur caractère opérationnel et leur fiabilité. D'autres approches, telles que la mesure du bien-être, ou le business inclusif, sont en développement, et de ce champ de recherche devraient progressivement naître des méthodes et outils opérationnels.

Comme illustré dans cet article, l'industrie sidérurgique essaie de contribuer à ces développements, en analysant comment le matériau acier peut s'améliorer et se positionner, maintenant et dans le futur, par rapport à un certain nombre de critères environnementaux et sociaux, pour devenir non plus un problème mais une solution. L'initiative SOVAMAT fait partie des démarches engagées qui permettent de rassembler les énergies vers le développement de méthodes consensuelles qui puissent mesurer avec justesse et objectivité la valeur durable des matériaux.

Références

- [1] Meadows D., Randers J., Meadows D., 2004; Limits to Growth. The 30-Year Update; Chelsea Green Publishing: 2004
- [2] <http://www.ipcc.ch>
- [3] <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>
- [4] Global Footprint Network, 2009; Ecological Footprint Atlas; Nov. 2009
- [5] EU, 2010; COM(2010) 2020, EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth; 2010
- [6] ArcelorMittal, 2012; Responsible business, sustainable growth; corporate responsibility report 2011, May 2012, 40 pp
- [7] EU, 2010 ; COM(2008) 699 final Initiative «matières premières» — répondre a nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe {SEC(2008) 2741} ; Bruxelles, 6.5.2010
- [8] EU, 1998; Waste Framework Directive - DIRECTIVE 2008/98/EC
- [9] EU, 2011; COM(2011) 21, A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy; 2011
- [10] WBCSD, 2010; Vision 2050, the new agenda for business; report; February 2010
- [11] CEN, 2012; EN 15804:2012 E Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products; 2012
- [12] CEN, 2011; EN 15978:2011: E ; Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method; Nov 2011
- [13] <http://www.cen.eu/cen/Sectors/Sectors/Construction/SustainableConstruction>
- [14] ADEME/AFNOR , 2009 ; BP X 30-323, Principes généraux pour l’affichage environnemental des produits de grande consommation, Référentiel de bonnes pratiques, version provisoire, Novembre 2009
- [15] EC – JRC & IES, 2011; Product environmental footprint guide, 2011
- [16] Le Moniteur, 2012 ; écoconception et construction ; cahier pratique le moniteur, n°5660, 26 pp
- [17] ISO, 2006 ; ISO 14 040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework”; 2006
- [18] ISO, 2006 ; ISO 14 044 “Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and Guidelines”; 2006
- [19] Grisel L., Osset P., 2004 ; l’Analyse du Cycle de Vie d’un produit ou d’un service, application et mise en pratique, Ed AFNOR
- [20] Guinée J., 2002; Handbook on Life Cycle Assessment, Kluwer Academic Publishers
- [21] Hauschild, M. Z., 2005; Assessing environmental impacts in a lifecycle perspective. Environ. Sci. Technol. 2005, 39 (4), 81A–88A.
- [22] Guinée J. B., Heijungs R., Huppés G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T. And Rydberg T., 2011; life cycle assessment: past, present and future, Environ. Sci. TEchnol.

45 (1) (2011) 90-96.

- [23] Calcas, 2007; scope of and scientific framework for the Calcas coordination action, deliverable 1 of WP2 revision1, march 2007
- [24] Birat JP, 2009; Materials, beyond Life Cycle Thinking, 24th ASK, Aix la Chapelle, 17-18 Sept. 2009
- [25] Reap, J.; Roman, F.; Duncan, S.; Bras, B., 2008; A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 2: impact assessment and interpretation. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2008, 13 (5), 374–388.
- [26] Levasseur A., Lesage P., Margni M., deschênes L. & Samson R., 2010 ; Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments, *environmental Science and technology* 44 (8): 3169-3174
- [27] Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Köhler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008; USEtox - The UNEPSETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7): 532-546, 2008
- [28] JRC European Commission, 2011; ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context First edition; EUR 24571 EN - First edition November 2011
- [29] Ekvall T. & Weidema Bo P., 2004; systems boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis; *Int J LCA* 9 (3) 161 -171
- [30] Ekvall T. & Andrae A. S. G., 2006; attributional and consequential environmental assessment of the Shift to Lead-Free Solders, *Int J LCA* 11 (5) 344-353
- [31] Brunner P. H. & Rechberger H, 2004; practical handbook of Material Flow Analysis, Lewis Publisher
- [32] Hatayama, H.; Daigo, I.; Matsuno, Y.; Adachi, Y., 2010; Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, SAM4, Nancy, 28-29 April 2010
- [33] Ekvall, T. and A.-M. Tillman, 1997; Open-loop recycling: criteria for allocation procedures. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2, 155-162.
- [34] Frishcknecht R., 2010; LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency, *Int J Life Cycle Assess* (2010) 15:666-671
- [35] Thomas J.-S. & Birat J.-P., 2011; Methodologies to measure the sustainability of materials – focus on recycling aspects; 5th International Conference on Society & Materials, SAM5, Metz, 11-12 May 2011
- [36] PWC, 2010; Développement durable, aspects stratégiques et opérationnels; Ed Francis Lefebvre, 2010; 596 pp
- [37] UNEP/SETAC LCI, 2009; Guidelines for social life cycle assessment of Products, 2009
- [38] Quantis et Agéco, 2011 ; Lignes directrices pour la réalisation d'analyses de cycle de vie environnementale et sociales – secteur des produits laitiers ; octobre 2011 ; 69 pp.
- [39] Carvallo-Aceves A. & Birat J.-P., 2012; Evaluating the contribution of materials to the well-being of society; SAM6 conference, Leuven; Mai 2012

- [40] ArcelorMittal, 2010; Annual Report
- [41] Worldsteel association, 2012 ; sustainable steel, at the core of a green economy ; 38 pp
- [42] WBCSD FLT, 2010 ; The Inclusive Business Challenge, Identifying opportunities to engage low-income communities across the value chain; Future Leaders Team 2009; July 2010
- [43] Prahalad C. K., 2009; The fortune at the bottom of the pyramid – eradicating poverty through profits; revised and updated version; Oct 2009; 407 pp
- [44] WRI & IFC, 2007; the next 4 billion, market size and business strategy at the base of the pyramid; 2007; 151 pp
- [45] ArcelorMittal, 2011; Life-Cycle Assessment Casa Bună Steel Housing performed using the LicaB® software; internal report
- [46] BSI, 2011 ; BS 8905 – Framework for the assessment of the sustainable use of materials – guidance ; 32 pp
- [47] Birat J.-P., Thomas J.-S., 2008; Beyond Life-Cycle Thinking: the SOVAMAT initiative and the SAM seminars, The 8th International Conference on EcoBalance, Tokyo, December 2008
- [48] Birat J.-P., Thomas J.-S., 2009; SOVAMAT, an Important Program Of The ESTEP; EU/Asia Workshop on Clean production and nanotechnologies, Seoul, European Commission DG Research
- [49] <http://www.sovamat.org>
- [50] <http://www.pact-carbon-transition.org>
- [51] <http://www.chaire-cycledevie.org/fr/>



L'adaptation aux changements climatiques: étude de cas sur les propriétaires forestiers privés en Wallonie

Valentine VAN GAMEREN

vvgamere@ulb.ac.be

Doctorante de la Chaire Conférence Permanente du Développement Territorial (CPDT- Wallonie)
Institut de Gestion de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire- Centre d'Etudes du Développement Durable - Université Libre de Bruxelles (Belgique)

Introduction

Les changements climatiques constituent aujourd'hui et pour l'avenir l'un des défis les plus préoccupants de notre société. Les travaux scientifiques, du GIEC en particulier, ont légitimé le besoin d'action volontariste à leur égard. Actuellement, cette action vise en majorité la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour limiter les impacts du dérèglement climatique. Or, certains impacts sont inévitables, ce qui justifie l'intérêt croissant pour l'adaptation à ces changements. Le GIEC définit ainsi l'adaptation aux changements climatiques comme l'« *ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques* » (GIEC, 2001, p173).

En la matière, on s'accorde sur l'importance à la fois d'une intervention publique anticipatrice et planifiée, qui peut cadrer et inciter les mesures d'adaptation par l'ensemble des acteurs concernés, et sur des actions concrètes *bottom-up* déployées par les acteurs privés/économiques aux différents niveaux de gouvernance.

De nombreux secteurs d'activité sont et seront touchés par les impacts des changements climatiques. Les activités du secteur primaire sont considérées comme particulièrement vulnérables car elles dépendent fortement de ressources naturelles sensibles au climat (Marshall, 2010). La foresterie fait partie de ces activités qui doivent et devront faire face à des impacts directs des changements climatiques, en l'occurrence sur les écosystèmes forestiers. De plus, la foresterie est l'un des rares secteurs où la notion de long-terme est si prégnante, vu les répercussions futures des décisions et investissements pris actuellement (la durée de vie des arbres dépassant souvent le siècle). Cette perspective à très long terme rend ainsi la thématique de l'adaptation d'autant plus intéressante à étudier dans ce secteur, ce que nous proposons de faire dans cette contribution à l'échelle de la Région wallonne.

La Wallonie est une Région dont un tiers du territoire est recouvert de forêts et où la filière forêt-bois fournit une série d'emplois locaux, surtout en région rurale. Par conséquent, l'adaptation du secteur forestier constitue un enjeu territorial et économique important pour la Wallonie.

Un groupe d'experts a été chargé par le ministre wallon de la forêt de faire un inventaire des impacts des changements climatiques sur les forêts et de proposer des mesures

d'atténuation et d'adaptation (Laurent et al, 2009). Par ailleurs, l'étude préparatoire au plan wallon d'adaptation, prévu au cours de l'année 2013, consacre également un volet à la vulnérabilité des forêts (Région wallonne, Agence wallonne de l'air et du climat, 2011). Plusieurs impacts des changements climatiques sur la forêt wallonne sont mentionnés dans ces documents, notamment : la modification des aires de distribution des espèces, avec des répercussions potentiellement importantes sur les essences principales des forêts wallonnes comme le hêtre, l'épicéa et le chêne pédonculé, des impacts sur la croissance des peuplements, l'augmentation de la fréquence et l'intensité des pullulations parasites et des maladies ainsi que des événements extrêmes (incendies, sécheresses, vagues de chaleur et peut-être des tempêtes). De plus, les effets des changements climatiques sur les forêts wallonnes doivent être appréhendés à travers leurs interactions avec les autres facteurs de stress tels que la pollution, l'exploitation intensive, une sylviculture inadaptée ou la surdensité du gibier qui pourraient limiter les capacités d'adaptation, de résistance et de résilience des écosystèmes forestiers.

Ces documents ne proposent pas encore de recommandations fixes et définitives en matière d'adaptation de la gestion forestière, en raison des incertitudes qui subsistent quant à l'ampleur des changements climatiques et des impacts sur la forêt, mais plusieurs propositions de bonnes pratiques sont déjà diffusées. L'essentiel porte sur des mesures « sans regret » et « win-win », c'est-à-dire des mesures qui ont des conséquences positives dans tous les scénarii climatiques envisagés et pour d'autres objectifs que celui de l'adaptation. Il s'agit d'une part de mesures techniques relatives à la gestion sylvicole, qui visent à maintenir et améliorer la capacité d'adaptation des écosystèmes, à travers par exemple la diversité d'essences et de structures et d'âges des peuplements, et à limiter les risques d'exposition des peuplements et les répercussions économiques potentielles, en particulier en optimisant les coûts de la sylviculture et en raccourcissant la durée du cycle de production. D'autre part, des mesures de type institutionnel sont proposées pour prévoir les risques et les gérer, à savoir l'augmentation des connaissances via la recherche et le suivi de la santé des peuplements, des mécanismes d'alerte précoce et de crise et la sensibilisation de tous les gestionnaires forestiers, publics et privés.

1. Questions de recherche et cadre théorique

Dans cette contribution, nous abordons la question de l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur forestier à travers une étude de cas : les propriétaires privés forestiers en Wallonie.

Nous nous intéressons spécifiquement aux acteurs privés car cet aspect de l'adaptation, tous secteurs confondus, est encore relativement peu investigué en comparaison aux actions publiques d'adaptation. En effet, la relative nouveauté du phénomène et la difficulté d'obtenir des données sur des actions décentralisées d'adaptation offre un grand potentiel de développement de ce champs de recherche. En plus de constituer un enjeu de recherche, mieux comprendre l'adaptation des acteurs privés représente une information dont les pouvoirs publics chargés de formuler les politiques d'adaptation ont besoin, notamment pour stimuler les entreprises et ménages à entreprendre des mesures pour s'adapter.

Dans le cas de notre étude de cas, l'adaptation privée est d'autant plus cruciale que la moitié de la forêt wallonne appartient à des propriétaires privés qui gèrent leurs propriétés en fonction de leurs propres objectifs (seuls ou assistés de gardes ou experts forestiers dans une plus ou moins large mesure). Leur liberté d'action est uniquement limitée par quelques contraintes réglementaires (Code forestier et Natura 2000 principalement).

La question centrale qui guide notre recherche (menée dans le cadre d'une thèse de doctorat) est de savoir *si, pourquoi et comment* les acteurs privés de la filière forêt-bois, ici les propriétaires forestiers privés, se préparent aux impacts des changements climatiques via des mesures d'adaptation.

A travers cette question de recherche, nous nous situons dans le courant de recherche de la pratique de l'adaptation. Comme son nom l'indique, ce courant s'intéresse aux initiatives pratiques d'adaptation et plus spécifiquement aux acteurs et à la manière dont celles-ci peuvent être mises en oeuvre (Smit et al, 2006; Tompkins et al, 2010). Dans cette approche, l'accent est mis sur la façon dont un système ou un ensemble d'acteurs expérimente le changement et sur les processus de décision liés à l'adaptation (Smit et al, 2006). De plus, l'adaptation peut être considérée comme un processus "*socio-cognitif-comportemental*" (Grothmann, 2003, p3) qui inclut à la fois des changements comportementaux, liés aux pratiques, et cognitifs, liés à la perception des risques.

Concrètement, nous entendons étudier la pratique de l'adaptation des propriétaires forestiers privés en analysant les mesures d'adaptation mises en oeuvre par ces acteurs et les facteurs qui entrent en jeu dans la mise en place de ces mesures, liés à la capacité d'adaptation. Notre compréhension du concept de « capacité d'adaptation », défini par le GIEC comme "*the ability or potential of a system to respond successfully to climate variability and change, and includes adjustments in both behaviour and in resources and technologies*" (Adger et al, 2007, p727), est assez large. En effet, l'hypothèse qui sous-tend notre analyse est que la mise en place de mesures d'adaptation ne dépend pas uniquement d'éléments objectifs de la capacité d'adaptation, notamment l'accès à la connaissance, aux ressources financières et aux techniques et la présence de mécanismes institutionnels favorables, mais aussi des perceptions de la nécessité d'agir face aux risques (motivation liée à la perception du risque) et de la capacité d'agir pour diminuer ces risques (perception de la capacité d'adaptation) (Fankhauser et al, 1999, Smit and Pilifosova, 2003; Smit et Wandel, 2006 ; Adger et al, 2007). Un apport spécifique de notre travail est d'intégrer de manière plus centrale les facteurs dits socio-cognitifs, liés aux perceptions des acteurs, qui ont souvent été sous-estimés dans la littérature sur la capacité d'adaptation. Pour ce faire, nous nous inscrivons dans la lignée des approches théoriques qui se sont penchées sur ce type de variables (Grothmann et al, 2005 ; Bleda et al, 2008).

2. Méthodologie

Les résultats que nous présentons dans ce papier sont issus d'une enquête qualitative menée sous forme d'entretiens semi-directifs avec des propriétaires forestiers privés.

Nous avons interrogé 14 personnes, sélectionnées au sein des propriétaires membres de la Société Royale Forestière de Belgique (SRFB), l'association des propriétaires forestiers privés pour des raisons de facilité d'accès aux coordonnées avec l'aide d'un collaborateur de la SRFB. Une seconde phase d'enquête se poursuit actuellement auprès de propriétaires non membres de la SRFB, dont les résultats ne sont pas présentés dans cette contribution.

La représentativité de l'échantillon n'est pas visée dans le cadre de cette enquête, dont l'objectif est plutôt de proposer une première exploration en profondeur de la problématique. Cependant nous avons voulu respecter une certaine diversité de l'échantillon sur base de plusieurs variables, notamment: la localisation et la superficie de la propriété, le type de peuplements forestiers et l'âge et le genre des propriétaires. Le biais de sélection au sein de la SRFB reste néanmoins une limite (raison pour laquelle une seconde phase d'enquête

est en cours). En effet, les propriétaires membres de cette organisation sont certainement plus impliqués dans leur gestion que la moyenne des propriétaires forestiers privés. De plus, les membres de la SRFB (environ 2600) ne représentent pas la majorité des propriétaires, bien que beaucoup de grands propriétaires soient affiliés, ce qui représente une surface non négligeable de la forêt privée. D'autre part, le nombre réduit d'entretiens reste une limite en soi, liée au choix de la méthode qualitative par entretiens, et des moyens humains (ressource en temps essentiellement) disponibles, même si le principe de saturation nous semble respecté. En guise de comparaison, notons que ce nombre de 14 propriétaires n'est pas hors norme par rapport à des enquêtes qualitatives semblables en terme d'approche et de public menées en Wallonie (Naturawal, 2011 ; Lirio-Garcia, 2012).

Les entretiens approfondis ont été menés en face à face entre novembre 2011 et janvier 2012. Un guide d'entretien constitué des questions classées par thématiques a servi de base aux interviews tout en laissant une place aux propos libres des personnes interrogées.

Les variables investiguées dans les entretiens sont de différents ordres, conformément à la littérature qui définit de nombreux facteurs de capacité d'adaptation. Tout d'abord des variables sociodémographiques sont incluses pour prendre en compte des caractéristiques personnelles des individus interrogés, sachant que la capacité d'adaptation dépend notamment de facteurs très individuels tels que l'âge ou le niveau de formation. Deuxièmement, des variables relatives à la propriété forestière (localisation, surface, etc) permettent de connaître le contexte spécifique dans lequel les mesures d'adaptation peuvent être prises, ce contexte pouvant être plus ou moins favorable à la mise en œuvre de telles mesures. Troisièmement, les variables de la gestion forestière donnent encore davantage d'informations sur le contexte d'adaptation. Par ailleurs, elles permettent de prendre en compte les perceptions des propriétaires vis-à-vis de leurs forêts et activités forestières qui peuvent également influencer le comportement d'adaptation. Enfin, les quatre autres groupes de variables – connaissances et techniques ; économiques, institutionnelles et sociocognitives- constituent des catégories de variables tirées directement de la littérature sur la capacité d'adaptation.

Chaque entretien a été enregistré et retranscrit intégralement et fidèlement aux propos recueillis. Ces retranscriptions ont servi de base à une analyse de contenu thématique.

3. Résultats

3.1. Mise en œuvre des mesures d'adaptation

Concrètement, dans ce premier échantillon, 12 propriétaires ont appliqué des mesures d'adaptation aux changements climatiques (cf tableau 1).

Dans les mesures déjà mises en œuvre, on retrouve d'abord le mélange d'essences, via différentes parcelles ou, plus rarement, un mélange pied à pied. D'autres mesures au niveau des plantations et qui contribuent au mélange sont le remplacement partiel de certaines essences dites menacées (hêtre, épicéa) au profit d'espèces plus résistantes (douglas, chêne sessile) et la plantation d'espèces plus « exotiques » (châtaigner). Il faut noter que le choix en faveur de la diversité d'essences, qui constitue effectivement une mesure typique d'adaptation aux changements climatiques selon les rapports scientifiques et officiels, ne répond pas uniquement, ni souvent en premier chef, à l'objectif d'adaptation aux changements climatiques. En effet, elle est considérée par les propriétaires qui la mettent en œuvre comme une mesure de bon sens, en prévention de différents dégâts possibles (maladies, tempêtes, changements climatiques) et en adéquation avec leurs objectifs de gestion (préservation de la biodiversité, aspect esthétique, goût de l'innovation etc).

D'autres types de mesures d'adaptation visent un risque précis, celui des tempêtes, qui existe déjà actuellement et qui, selon un certain nombre de propriétaires interrogés, pourrait s'accroître dans les années à venir. Ces mesures techniques, à la fois réactives aux tempêtes passées et anticipatives aux tempêtes futures, consistent à (i) intensifier la sylviculture c'est-à-dire à raccourcir le cycle de production des arbres pour réduire le risque de perte d'investissement, (ii) vendre ses bois ou mettre une parcelle à blanc plus tôt que prévu même si le prix est mauvais, (iii) prendre en compte l'orientation des vents pour le marquage des éclaircies et les plantations et (iv) faire des éclaircies précoces pour augmenter la stabilité des peuplements.

D'autres mesures techniques, de différents ordres, sont également mentionnées par quelques propriétaires, comme la gestion forestière de type Pro Silva, c'est-à-dire une sylviculture irrégulière proche de la nature avec de la régénération naturelle et le maintien d'un couvert végétal notamment. Une autre personne a arrosé les plantations au printemps 2011 en réaction à la sécheresse, ce qui est une adaptation ponctuelle, réactive et inhabituelle, en réponse à un besoin immédiat et urgent. Ce même propriétaire effectue d'autre part des mesures et des observations sur ses peuplements afin de repérer des impacts éventuels de la sécheresse sur leur accroissement. Si cette mesure est sujette au doute concernant son efficacité vis-à-vis de l'évaluation des impacts des changements climatiques sur sa forêt, en raison des différents paramètres qui conditionnent l'accroissement des arbres, elle montre bien comment le propriétaire essaye de mieux comprendre sa forêt et de s'approprier une connaissance de celle-ci. Cette action est donc plus du registre de la connaissance que de la technique proprement dite.

Par ailleurs, certains propriétaires mettent en place des mesures de nature « purement » cognitive, c'est-à-dire liées à la recherche ou l'échange d'informations : organisation des réunions entre propriétaires pour discuter d'enjeux communs, y compris les changements climatiques, discussions et demande de renseignements spécifiques à des spécialistes (administration eau et forêts, expert forestier) en anticipation à une plantation ou en réponse à un dépérissement d'une essence ou lectures d'articles scientifiques et échange en famille. Ces mesures cognitives ciblées sur la thématique des changements climatiques et de l'adaptation peuvent être des préalables à l'application des mesures techniques citées ci-dessus ou en rester au stade de la réflexion. Elles peuvent contribuer en tous cas à augmenter la capacité d'adaptation de ces propriétaires en enrichissant leur niveau de connaissance et d'appropriation du problème.

Concernant les mesures envisagées et pas encore mises en œuvre, évoquées par 9 propriétaires, on observe également différents registres d'action. D'une part, les plantations d'essences considérées comme plus adaptées aux changements climatiques, pour remplacer certaines essences menacées et/ou enrichir la diversification, sont mentionnées, y compris par des propriétaires qui ont déjà fait des choix dans ce sens. A ce propos, une personne n'est pas encore fixée sur ce choix et va se renseigner auprès de la SRFB et de son pépiniériste. D'autre part, des mesures spécifiques contre la sécheresse sont mentionnées : faire l'essai de déplacer la période de plantation en automne pour éviter les dégâts des sécheresses printanières et mettre en place un système de surveillance et/ou de protection anti-incendie. Un propriétaire mentionne également qu'il serait favorable à une amélioration génétique afin d'intensifier la production et de réduire le risque d'exposition aux tempêtes. Si cette mesure n'est pas en soi de son ressort, elle témoigne d'une ouverture à appliquer des innovations technologiques. Un autre croit très fort à l'agroforesterie pour une meilleure protection contre le vent notamment et souhaite développer un tel projet. Notons cependant que, selon des experts, l'agroforesterie apporterait davantage d'intérêt d'un point de vue agricole, via l'amélioration du sol, que forestier (interviews SRFB et professeur Faculté de Gembloux).

A côté de ces mesures techniques, un propriétaire évoque l'éventualité d'une adaptation de type commercial via un changement d'orientation de sa production, en l'occurrence miser davantage sur le bois de chauffage si des problèmes conséquents arrivent sur les peuplements destinés à production de bois d'œuvre. Cette mesure, qui n'est pas proposée par les différents rapports scientifiques visant à maintenir l'activité de production de bois d'œuvre, est révélatrice du fait que certains propriétaires peuvent, même de manière hypothétique, envisager de modifier leur activité initiale en réponse à des impacts perçus ou réels.

Enfin, notons que quelques propriétaires précisent qu'ils ne planteront pas d'autres essences en raison des limites de sol et que, même si leur sol le permettait, ils ne changeraient pas toute leur gestion en fonction des changements climatiques. Ce genre de réaction montre que les propriétaires peuvent être attachés à une connaissance et une pratique qu'ils ont acquises par l'expérience. Hormis certaines limites réelles, liées au site, des phénomènes d'inertie peuvent ainsi être attendus si le décalage entre les mesures « traditionnelles » et les mesures proposées en matière d'adaptation est considéré comme trop important par le propriétaire.

Tableau 1 : mesures d'adaptation mises en œuvre ou envisagées par les propriétaires

Mesures (de la plus à la moins fréquente) Propriétaires (n° selon l'échantillon, n=14) par ordre décroissant de mesures d'adaptation mises en œuvre	Mesures pour la diversité des essences			Mesures contre le risque de tempêtes													Total mesures mises en œuvre	Total mesures envisagées	
	Mélange d'essences	Remplacement partiel d'essences menacées (hêtre/épicéa)	Plantation d'espèces du Sud/ non indigènes	Vente/ mise à blanc plus tôt	Prise en compte de l'orientation vents pour éclaircies et plantations	Eclaircies précoces	Raccourcissement du cycle de production	Gestion Pro Silva / régénération naturelle	Recherche/échange d'informations sur les changements climatiques et l'adaptation	Arrosage des plantations pendant sécheresse	Mesures d'observations de la croissance des peuplements	Modification de la période de plantation	Installation d' un système de surveillance incendie	Amélioration génétique des plants	Agroforesterie	Miser sur le bois de chauffage			
5	■								■	■	■						○	4	1
9	■	■	○					■	■									4	1
10	■			■				■	■									4	0
3	■		■				■						○	○				3	2
6	■				■			■							○			3	1
14	■	○				■						○						2	2
4		■ / ○		■														2	1
7		■							■									2	0
1	■							■										2	0
11		○				■												1	1
12					■													1	0
13	■																	1	0
2		○									○							0	2
8		○																0	1
Total mesures mises en œuvre	8	3	1	2	2	2	1	4	4	1	1	0	0	0	0	0	0		
Total mesures envisagées	0	5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1		

■ Mesure mise en œuvre ○ Mesure envisagée

3.2. Déterminants de la mise en œuvre de mesures d'adaptation

Afin d'analyser les influences existantes entre la décision et la mise en œuvre de mesures d'adaptation et les différentes variables explorées dans les entretiens, et étant donné que l'ensemble des propriétaires interrogés ont mentionné des mesures d'adaptation, nous pouvons différencier plusieurs degrés ou « profils » d'adaptation, à savoir :

- Profil 1 - la mise en œuvre actuelle de mesures proactives et réactives : 11 cas
- Profil 2 - la mise en œuvre actuelle de mesures uniquement réactives : 1 cas
- Profil 3 - la réflexion concernant des mesures envisageables sans mise en œuvre actuelle : 2 cas

Selon nos premières analyses, il semble que plusieurs variables influencent la mise en œuvre de mesures d'adaptation. Nous les exposons dans les points ci-dessous.

3.2.1. Croyance dans les changements climatiques

Sur les 14 propriétaires, 12 reconnaissent l'existence des changements climatiques dont 11 leur origine anthropique. Deux personnes sont plus sceptiques bien qu'elles ne rejettent pas totalement les changements climatiques ni la part de responsabilité humaine. Elles s'interrogent mais n'ont pas un point de vue tranché sur la question et ne réfutent donc pas clairement l'existence de changements climatiques. Par ailleurs, il y a quelques personnes parmi les « convaincus » qui se posent des questions sur les changements climatiques tout en se ralliant à leur réalité, ce qui montre bien un degré de croyance divers parmi les propriétaires interrogés.

La reconnaissance de la réalité des changements climatiques joue probablement un rôle dans la mise en œuvre de l'adaptation puisque la majorité des propriétaires qui instaurent des mesures d'adaptation anticipatives y croient. Cependant le doute voire le « scepticisme » à l'égard des changements climatiques ne constitue pas une barrière intrinsèque à la mise en place de mesures puisqu'une des deux personnes les plus sceptiques se retrouvent dans le profil 1.

3.2.2. Perception du risque des changements climatiques

Tous les propriétaires ont déjà observé ou expérimenté des impacts de nature climatique sur leur forêt. Parmi ceux qui sont mentionnés, on retrouve en priorité les tempêtes mais aussi des sécheresses, un dépérissement des chênes et des hêtres et un assèchement des épicéas. Quelques personnes notent également une avancée de la fructification et des modifications dans la faune et la flore, ainsi qu'une croissance des bois qui tend à augmenter.

De plus, la totalité des propriétaires s'attend à des impacts climatiques dans un futur plus ou moins lointain. Certains ne savent pas précisément à quels types d'impacts ils pourraient être confrontés, d'autres ont une idée un peu plus claire sur le sujet. A ce titre, la plupart mettent en avant les phénomènes exceptionnels tels que les sécheresses, les tempêtes, les maladies mais certains insistent également sur les phénomènes graduels comme le réchauffement, les modifications hydriques et les gels tardifs. Des impacts plus ciblés comme la menace pour certaines essences, le hêtre ou l'épicéa, sont également cités. Enfin, deux propriétaires évoquent l'impact positif futur des changements climatiques sur l'accroissement des peuplements. Les impacts envisagés sont donc clairement perçus comme des risques plutôt que des opportunités.

En comparant les résultats concernant les perceptions des propriétaires à propos des

impacts des changements climatiques avec les impacts identifiés par les rapports officiels européens et wallons, on repère des points communs mais aussi des différences. D'une part, la plupart des impacts identifiés par les propriétaires font partie des impacts cités dans ces documents, comme l'augmentation de température, des modifications hydriques, des gels tardifs, l'augmentation de la croissance végétale, la survenue d'évènements extrêmes tels que les sécheresses et la modification des aires de distribution des espèces avec comme conséquence la menace pour des essences phares (épicéa, hêtre). Cependant d'autres impacts sont évoqués par certains propriétaires mais sans les associer d'emblée aux changements climatiques, alors qu'ils sont mentionnés dans les rapports officiels. Il s'agit en particulier de la modification des aires parasites et de l'augmentation de la fréquence des pullulations et des invasions. Par ailleurs, d'autres impacts comme les modifications de phénologies (débourrement, floraison, fructification, chute des feuilles) ne sont quant à elles pas du tout évoquées par les propriétaires parmi les impacts futurs des changements climatiques. Enfin, la crainte des tempêtes est très visible du côté des propriétaires. En effet, les rapports officiels sont plus prudents quant à l'augmentation de la fréquences des tempêtes : celles-ci sont considérées comme des aléas climatiques qui représentent évidemment un stress pour les forêts mais ne sont pas mises sur le même plan que les vagues de chaleur, sécheresses et inondations qui vont augmenter avec plus de certitude. L'accent mis sur les tempêtes de la part des propriétaires privés peut sans doute s'expliquer par deux raisons complémentaires. D'une part, ces phénomènes sont directement visibles et palpables de par leur caractère exceptionnel, comparés à des effets plus graduels. D'autre part, la plupart des propriétaires interrogés ont pendant leur gestion expérimenté des dégâts de tempêtes, induisant un biais de perception lié à cette expérience.

Dans nos résultats, les propriétaires qui estiment davantage de probabilité et de gravité du risque lié aux changements climatiques se situent tous dans le premier profil. Une perception du risque relativement haute semble donc constituer un facteur d'influence de la mise en œuvre des mesures anticipatives d'adaptation.

3.2.3. Perception de la capacité d'adaptation

La perception de la capacité d'adaptation personnelle varie en fonction des propriétaires. La moitié d'entre eux ont une confiance assez élevée dans l'efficacité de leur gestion en réponse aux changements climatiques, en l'occurrence via essentiellement la diversité des parcelles et d'essences, parfois réputées spécifiquement plus résistantes aux changements climatiques (douglas, mélèze hybride, chêne sessile ou d'Amérique). Ils considèrent qu'il s'agit d'une mesure de bon sens qui a de toutes façons des avantages par rapport au climat actuel comme la meilleure résistance contre les maladies et les tempêtes et la préservation de la biodiversité et qui, en présence des incertitudes sur les prévisions climatiques, garantit une survie d'ensemble face aux changements climatiques puisque certaines essences résisteront certainement mieux à tel ou tel type d'impact. Notons que ces propriétaires sont bien conscients des incertitudes concernant les changements climatiques et les possibilités d'adaptation, leur confiance provient surtout du fait qu'ils ont le sentiment de mettre un maximum d'atouts de leur côté.

Cinq propriétaires ont une confiance plus limitée dans leur marge de manœuvre adaptative. Parmi eux, certains mettent en évidence les phénomènes extrêmes, en particulier les tempêtes, contre lesquelles ils ne voient pas comment agir vraiment efficacement de façon proactive, même si certains essayent de s'y préparer en modifiant l'ordre des plantations. Par ailleurs, certains mettent l'accent sur les incertitudes des projections climatiques, d'autres se

sentent limités dans les choix de mesures qui s'offrent à eux.

Enfin, deux propriétaires n'ont pas vraiment conscience de leur propre capacité d'adaptation. L'un s'en remet à l'expert à qui il délègue entièrement sa gestion pour prendre les décisions. L'autre préfère ne pas s'en faire pour des « choses dont on est pas sûr » et a confiance dans la capacité d'adaptation de la nature d'une part et dans les décisions que prendront ses descendants d'autre part.

Nous remarquons que les propriétaires les plus confiants concernant leur propre capacité d'adaptation, se trouvent dans le premier profil, tandis que les deux qui ne sont pas vraiment conscientes de leur marge de manœuvre personnelle se situent dans le troisième profil. Le propriétaire du second profil a une confiance limitée dans sa propre capacité adaptative. Cette variable de la perception de la capacité d'adaptation semble ainsi avoir une influence sur la mise en œuvre de mesures d'adaptation.

3.2.4. Représentations de la forêt

Les rôles et fonctions que les propriétaires attribuent à leurs forêts sont très divers. Les fonctions économiques (production de bois d'œuvre et rentabilité des investissements), sociales (ouverture au public pour promenades, aspect pédagogique, source d'emplois) et écologiques (biodiversité, adéquation essences-station, régulation du climat) sont évoquées à différents degrés et dépendent des sensibilités et expériences personnelles.

De plus, la dimension de transmission d'un patrimoine familial est évoquée par tous les propriétaires, à une exception près. L'aspect plaisir et passion de la gestion forestière est également mentionnée par une partie des propriétaires. Certains font part aussi de la fonction esthétique de la forêt.

Selon nos analyses, les représentations des propriétaires de la forêt et les objectifs de gestion qui en découlent conditionnent la mise en œuvre de mesures d'adaptation, surtout le choix des types de mesures. En effet, les objectifs initiaux des propriétaires constituent le facteur déterminant dans le choix de toute décision de gestion, qui surpasse parfois, voire souvent, le facteur physique à savoir la nature de la station forestière (ceci explique pourquoi, par choix économique et/ou traditionnel, certains propriétaires de forêt wallonne ont planté/plantent par exemple de l'épicéa dans des sols non adaptés). La vision et les fonctions attribuées à la forêt sont donc déterminantes dans la façon dont les propriétaires vont ou ne vont pas envisager la question de l'adaptation. Ainsi, les mesures d'adaptation mises en avant sont à l'heure actuelle, dans les cas que nous avons observés, des mesures qui correspondent aux aspirations des propriétaires plutôt que des mesures qui les remettent en question. Dans le cas du mélange, la donnée changements climatiques vient s'ajouter aux autres justifications qui ont dicté ce choix mais n'est pas la seule. C'est pour cela que nous qualifions cette mesure de sans regret et de win-win puisque qu'elle a des avantages même en l'absence de changements climatiques. Pour les propriétaires qui comptent surtout sur les espèces résineuses, leurs choix d'adaptation se portent plutôt sur le remplacement de certaines espèces résineuses (épicéa) par d'autres (douglas, mélèze) et/ou sur le mélange d'essences résineuses avec éventuellement un peu de feuillus ou sur des mesures d'éclaircies fortes et précoces et d'orientation des plantations en fonction des tempêtes.

Par conséquent, il semble que cette variable de la représentation des rôles et fonctions de la forêt est fondamentale quand on parle d'adaptation puisque les propriétaires appliquent des mesures compatibles avec leurs représentations respectives.

3.2.5. Connaissance et accès aux personnes ressources

Les connaissances des propriétaires concernant la foresterie ont différentes sources. La moitié des interviewés ont une formation initiale ou secondaire en agronomie/foresterie, dont deux exercent/ont exercé une activité forestière à titre professionnel. Certains ont acquis une expérience pratique étant jeunes, en travaillant avec leurs parents ou avec un garde forestier, tandis que d'autres ont appris sur le tas au moment de la reprise de la propriété.

A l'exception du propriétaire qui n'a pas géré sa forêt pendant 15 ans, l'ensemble des propriétaires participe aux formations et/ou excursions organisées par la SRFB (et/ou d'autres associations) et/ou enrichit ses connaissances à travers les lectures et les échanges personnels. Quelques propriétaires ont également accès à un réseau plus large dans le milieu forestier, grâce à leur formation initiale en agronomie/foresterie. Certains sont également devenus proches d'agents de l'administration des eaux et forêts ou d'experts forestiers. Les discussions et rencontres, formalisées ou non, entre amis et famille qui possèdent des propriétés forestières favorisent également la constitution d'un réseau. Un propriétaire participe enfin à plusieurs groupes de travail, notamment en Flandre et est membre d'associations de pays limitrophes à la Belgique. L'appartenance à un tel réseau semble constituer un facteur primordial en terme d'accès à la connaissance et aux conseils de gestion. Notons que ces résultats ne sont pas représentatifs de l'ensemble des propriétaires privés, ce qui est une conséquence du biais de sélection au sein de la SRFB.

Il semble que l'acquisition de connaissances en foresterie, propres et grâce à l'accès à un réseau de personnes-ressources, est plus que probablement un facteur qui favorise la mise en œuvre de mesures d'adaptation. En effet, tous les propriétaires qui ont une formation en foresterie se retrouvent dans le profil 1, les autres propriétaires dans le cas ont accès à des personnes qui peuvent leur fournir des conseils ou échanger leurs expériences. Le seul propriétaire qui est plus isolé et ne maîtrise pas la gestion forestière fait partie du profil des propriétaires qui n'ont pas encore mis en œuvre de mesures d'adaptation.

3.2.6. Responsable de la gestion

Dans la majorité des cas de notre échantillon, les propriétaires gèrent seuls leurs forêts. Dans d'autres cas, il s'agit d'une gestion familiale lorsque la propriété est en indivision ou sous forme d'un groupement forestier, assistée d'un expert forestier dans un cas. Dans le dernier cas, il y a eu absence de gestion pendant une quinzaine d'années jusqu'à l'intégration de la propriété dans un projet de mobilisation des propriétaires mené par la SRFB (Regiowood), ce qui a mené le propriétaire à déléguer la gestion de sa forêt à un expert forestier partenaire du projet.

Dans deux cas, les propriétaires ont engagé un garde forestier pour assurer les travaux réguliers. Les autres propriétaires font les travaux eux-mêmes, ce qui fait partie de leur plaisir, ou font appel à des travailleurs ou entrepreneurs du coin en fonction des besoins.

Par ailleurs, presque la totalité des propriétaires reçoivent des conseils ponctuels de « personnes-ressources » et/ou échangent avec d'autres propriétaires (cf supra).

Concernant cette variable, on peut remarquer que la prise en main de la gestion constitue ici un facteur qui semble lié à la mise en place de l'adaptation, puisque la totalité des personnes qui ont appliqué des mesures d'adaptation gèrent leur forêt sans tiers ou accompagné d'un garde dans deux cas. Une seule personne délègue sa gestion entièrement et se retrouve dans le groupe de ceux qui n'ont pas encore appliqué de mesures d'adaptation. Cependant, cette variable du responsable de la gestion est sans doute liée à la variable des connaissances

forestières puisqu'il faut un minimum de connaissances en foresterie pour gérer une propriété forestière. Par conséquent, l'influence que nous remarquons ici serait ainsi corrélée à l'influence des connaissances sur la mise en œuvre de mesures d'adaptation (cf supra).

Par ailleurs, en cas de collaboration ou délégation de la gestion à des professionnels, que ce soit des experts, des gardes ou autres, se pose la question de la prise en compte de la problématique des changements climatiques et de l'adaptation par ces acteurs puisqu'ils ont un rôle de décision (une enquête sur les professionnels de la gestion est en cours).

3.2.7. Mode d'acquisition de la propriété

Dans notre échantillon, la majorité des propriétaires ont hérité de leur forêt. Quelques uns ont complété cet héritage par un achat de terrains forestiers. Seulement deux propriétaires ont acheté l'entièreté de leur propriété eux-mêmes.

Tous les propriétaires qui ont acheté au moins une partie de leur propriété ont mis en œuvre des mesures d'adaptation anticipatives, ce qui n'est pas le cas de tous les propriétaires qui en ont hérité. Face à ce résultat, on peut ajouter que ces propriétaires sont passionnés et très impliqués dans la gestion forestière, et peut-être plus susceptibles de s'intéresser à des enjeux tels que l'adaptation aux changements climatiques. Mais à nouveau, comme dans le cas du responsable de la gestion, la variable de la connaissance en foresterie doit jouer un rôle puisque ces propriétaires disposent d'une formation en foresterie ou sont actifs dans des réseaux liés à la forêt.

Cependant, il faut noter que l'achat d'une propriété à blanc, comme ça a été parfois le cas pour les propriétaires visés, permet de « repartir à zéro » c'est-à-dire de créer une forêt propre aux objectifs du propriétaire, dans les limites du sol disponible, ce qui est peut-être moins évident pour le propriétaire qui hérite d'un bois dessiné par les choix de ses prédécesseurs.

3.2.8. Contexte réglementaire

Quelques propriétaires ont bénéficié de subsides de la Région pour des plantations de feuillus. Cette mesure, qui n'est plus en vigueur actuellement, a selon certains d'entre eux facilité, voire incité, ce choix de gestion. D'autres sont par contre assez critiques ou méfiants par rapport aux subsides, évoquant des lourdeurs administratives ou la crainte de perte d'indépendance. Le nouveau Code forestier est cité dans quelques cas comme une influence positive, notamment la suppression des droits de succession sur la valeur des bois sur pied qui annule le frein de la plantation de feuillus à longue durée de vie.

Les critiques sont par contre assez vives concernant la réglementation Natura 2000, qui est perçue par une partie des propriétaires comme un ensemble de mesures très administratives, contraignantes pour la production et pas toujours cohérentes par rapport à l'objectif, généralement considéré comme louable, de préservation de la biodiversité. De plus, l'interdiction de certaines essences dites « exotiques » n'est pas comprise par quelques propriétaires qui considèrent certaines d'entre elles comme des essences d'avenir face aux changements climatiques. Les incohérences, complexités ou difficultés au niveau législatif et réglementaire, concernant la politique de recherche forestière, l'agroforesterie, le gibier, les pesticides ou les frais d'achat de parcelles, sont également mises en avant par quelques propriétaires.

Par rapport à ces résultats, nous pouvons observer que le recours au subside a été assez positif pour les propriétaires du profil 1, alors que ceux du profil 2 et 3 n'en ont pas bénéficié

ou considèrent que le jeu n'en vaut pas la chandelle. Il faut cependant insister sur le fait que les propriétaires qui ont bénéficié de ces subsides avaient déjà comme objectif initial de diversifier les essences : les subsides ont donc facilité une ambition de gestion préexistante. L'incitant financier que cela représente n'est cependant pas négligeable et la présence de tels instruments politiques semble constituer un élément à prendre en considération dans la mise en place de l'adaptation, à condition que les montants en valent la peine par rapport aux démarches nécessaires, ce qui est bien sûr très subjectif et dépend de la perception et des moyens de chaque propriétaire et/ou des appuis disponibles (par exemple gestion via expert qui s'occupe de ce genre de démarche administrative).

D'autre part, la question de Natura 2000 semble problématique vis-à-vis de l'adaptation, selon la perception des propriétaires. En effet, sans d'empêcher toute mesure d'adaptation, il semble que Natura 2000 puisse interdire cependant certaines options de diversification imaginées par certains propriétaires, à savoir les espèces non indigènes.

Au final, nous pouvons conclure à une influence de la législation forestière sur la mise en place de certaines mesures d'adaptation, de manière incitante et/ou contraignante, même si les réactions des propriétaires ne sont pas unanimes, principalement en matière de subsides.

3.2.9. Age et éducation du propriétaire

Comme dit dans la partie consacrée à la variable des connaissances, le niveau d'éducation des propriétaires peut influencer la mise en œuvre de mesures d'adaptation. En effet, les personnes qui disposent d'une formation forestière ont toutes mis en place des actions anticipatives. Par ailleurs, le type de formation et d'activité professionnelle peut parfois influencer la façon dont les propriétaires perçoivent leurs bois et déterminent leurs objectifs de gestion (par exemple une vision d'ingénieur assez cartésienne par rapport à une vision d'artiste presque onirique de la nature), ce qui peut, par ce biais, délimiter le choix des mesures envisagées.

Par ailleurs, les propriétaires les plus jeunes de notre échantillon se trouvent tous dans le profil 1, ce qui peut suggérer une plus grande propension à considérer la problématique de l'adaptation dans la gestion forestière chez la jeune génération.

D'autres variables prises en compte dans l'analyse se semblent pas ou peu influencer la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux changements climatiques. Selon nos résultats, il s'agit de la localisation et la superficie de la propriété, du statut juridique de la propriété (propriété individuelle ou familiale, groupement forestier), de l'équation coûts/revenus de la gestion forestière et du sexe du propriétaire.

4. Discussion

Cette première phase de l'enquête a été menée sur des membres de la SRFB uniquement, ce qui nous empêche à ce stade de présenter un panorama des différents profils de propriétaires vis-à-vis de l'adaptation dans cette contribution. La seconde phase de l'enquête permettra d'enrichir les profils et ainsi de proposer des pistes de discussion relatives aux différents types de propriétaires identifiés.

En attendant, nous pouvons déjà présenter quelques pistes de réflexion concernant la mobilisation des propriétaires forestiers privés vis-à-vis de la question de l'adaptation aux changements climatiques. Conformément à notre objectif de recherche, l'un des intérêts de ce type d'analyse est en effet de tirer quelques enseignements potentiellement utiles pour

envisager une politique d'adaptation visant à stimuler l'action des acteurs privés de terrain.

4.1. Communication et sensibilisation des propriétaires forestiers privés

Tout d'abord, nos résultats montrent que les niveaux de conscientisation, de connaissance et de mise en œuvre de l'adaptation diffèrent selon les propriétaires interrogés. Il existe donc un grand potentiel de sensibilisation de ces acteurs. En effet, l'une des conclusions de cette enquête est le fait qu'il existe un décalage entre la vulnérabilité perçue par les propriétaires interrogés et celle identifiée par les scientifiques, de par les différents impacts qui sont mis en évidence de part et d'autre. Le référentiel diffère en effet selon ces deux types d'acteurs: les scientifiques identifiant les vulnérabilités potentielles au niveau « global » tandis que les propriétaires les évaluent en fonction de leurs observations locales et de l'information, partielle, qu'ils reçoivent et retiennent.

Ce décalage peut selon nous poser un problème en terme d'adaptation, dans le sens où certains impacts pourraient ne pas être anticipés au profit d'autres risques davantage perçus et craints. Ainsi, nous avons observé que les phénomènes exceptionnels, déjà expérimentés pour certains, qui se matérialisent par des dégâts visibles voire immédiats, en particulier les tempêtes, semblent davantage marquer les esprits et inquiéter les propriétaires forestiers privés que les impacts plus graduels. Les tempêtes sont d'ailleurs considérées par la plupart des propriétaires comme le risque majeur pour la gestion de leur forêt, tous risques confondus.

Les propriétaires interrogés ne semblent pas manquer d'informations sur les changements climatiques de manière générale, le problème semble être plutôt un manque d'informations 1) émanant d'une source dans laquelle les propriétaires ont confiance et 2) qui correspondent à leurs besoins, c'est-à-dire qui font référence à des mesures pratiques pour s'adapter.

Ces éléments relatifs à la communication du risque et de l'adaptation nous semblent importants car ils ont très probablement des implications sur la manière dont les propriétaires perçoivent les risques liés aux changements climatiques et leur capacité d'adaptation, qui selon les résultats de cette enquête sont des facteurs d'influence de la décision de s'adapter. Nous pouvons donc formuler quelques réflexions à cet égard sur base de ce constat.

Au niveau de la première donnée, la source d'information crédible, il ressort des entretiens que les propriétaires de notre échantillon ne font pas ou peu confiance aux médias mais aux scientifiques, surtout climatologues et ingénieurs eaux et forêt, et aux gens de terrain, professionnels et associations du secteur forestier. C'est donc plutôt à travers ces intermédiaires que nous pensons que la sensibilisation et la diffusion des informations relatives à l'adaptation devrait passer, surtout que les propriétaires valorisent en général beaucoup les conseils qu'ils peuvent recevoir entre autres des experts, gardes forestiers et des revues et activités des associations. La question de la connaissance dont disposent ces acteurs sur la problématique des changements climatiques et de l'adaptation est donc selon nous cruciale puisqu'une partie importante de cette diffusion de la connaissance auprès des propriétaires passe par eux. Or, il semble que le sujet est encore peu discuté au sein des professionnels de la filière bois (enquêtes sur ces acteurs en cours) alors que des scientifiques travaillent pourtant sur le sujet. De manière générale un décalage existe donc entre ceux qui produisent les connaissances scientifiques et ceux qui doivent les appliquer, ce qui est contraire aux conseils de gestion adaptative forestière liés à l'intégration des connaissances des différents acteurs concernés. En effet, un travail de traduction est indispensable pour que les langages des scientifiques et des gestionnaires puissent se rencontrer au lieu de créer des malentendus et des pertes de légitimité mutuelle.

Nous tenons cependant à souligner le rôle des associations : la SRFB a publié dans sa revue *Silva Belgica* un article basé sur les propositions d'adaptation du groupe d'experts wallons (SRFB, 2011) et a prévu de poursuivre la vulgarisation des résultats de recherche (notamment ceux de l'Université de Liège (Gembloux Agro-Bio tech) relatifs à l'adaptation du fichier écologique des essences). L'autre grande revue forestière, *Forêt wallonne*, avait également publié un article sur la question dès 2008, basé sur des travaux de recherche français (Legay et al, 2008). La SRFB organise aussi quelques activités sur la problématique cette année et propose à certains propriétaires plus dynamiques de faire des expérimentations chez eux en essayant de nouvelles essences (interview SRFB). Enfin, de manière générale, la SRFB veut axer la sensibilisation sur des actions concrètes auxquelles le propriétaire peut donner sens à court terme tout en intégrant les défis à plus long terme. Ces types de conseils vont davantage dans le sens d'une gestion adaptative.

Reste à régler une question épineuse, celle des nombreux propriétaires privés non-membres de la SRFB, dont une part importante de petits propriétaires (seconde phase de l'enquête en cours). Si des relais peuvent exister pour une partie d'entre eux à travers les professionnels du secteur ou autres propriétaires qu'ils côtoient dans le cadre de la gestion de leurs forêts, d'autres sont isolés voire absents de leur gestion. Dans ce contexte, la priorité reste la sensibilisation à la gestion, qui inclut des objectifs multifonctionnels y compris celui du rôle de la forêt dans la régulation du climat (fonction atténuation des changements climatiques) et sera l'occasion d'aborder la question d'une gestion adaptative également. En cela, les activités de mobilisation des propriétaires entreprises par la SRFB, telles que dans le cadre du projet INTERREG *Regiowood*, devraient être poursuivies à plus large échelle et transmettre le plus tôt possible les pratiques de gestion favorables à l'adaptation.

Ceci nous amène au second élément, la diffusion d'informations utiles aux propriétaires. Nous ne pensons pas que les propriétaires doivent forcément tout savoir des changements climatiques mais que les éléments qu'ils doivent prendre en compte dans leur gestion doivent être mis en évidence par les acteurs qui interprètent les projections climatiques sur le secteur forestier, c'est-à-dire des scientifiques qui sont liés au terrain et les professionnels et associations du secteur. D'où l'importance des relais et des rencontres entre parties prenantes, comme soulignée dans le paragraphe précédent.

Deux aspects nous semblent importants sur ce point : d'une part donner aux propriétaires une vision exhaustive mais pas décourageante des risques liés aux changements climatiques et d'autre part, lier cet éventail de risques à des possibilités d'action adaptative.

Sur le premier point, notre enquête a montré que certains risques n'étaient pas ou peu perçus par les propriétaires interrogés, comme les modifications de la phénologie et de la croissance des arbres, ou pas liés aux changements climatiques, comme l'augmentation des maladies. Les tempêtes sont par contre perçues comme le risque majeur. Une « remise à niveau » des connaissances concernant les principaux risques attendus via une diffusion à large portée auprès des propriétaires nous semble donc indispensable. L'usage d'un langage approprié, pas trop jargonneux, et d'un support adéquat, complet et synthétique mais pas simpliste serait la combinaison idéale.

Concernant le second point, lier les impacts à des actions concrètes d'adaptation, les mesures sans regret et win-win comme le mélange pourraient du moins être promues, ce qui est déjà fait en partie actuellement, en précisant que leurs avantages incluent l'idée d'adaptation aux changements climatiques. Bien sûr, toutes les mesures ne sont pas applicables à tous les sites et certains facteurs physiques, principalement le type de sol, constituent des limites importantes. Néanmoins, il serait possible en tous cas de mieux faire passer l'idée

que des actions anticipatrices sont possibles au cas par cas. A cet égard, un point central est de montrer que l'obstacle de l'incertitude peut être surmonté via une gestion forestière qui tient compte progressivement des observations et résultats obtenus. En effet, des solutions robustes en situation d'incertitude sont celles qui tentent de faire « suffisamment bien » sur différents objectifs plutôt que celles qui visent l'optimisation d'un seul paramètre, la production par exemple. En ce sens, un message possible est que tous les gestionnaires, publics et privés, sont logés à la même enseigne - agir en situation d'incertitude- et qu'il n'est pas conseillé d'attendre l'arrivée de consignes de gestion précises et unilatérales sous peine de les attendre longtemps et d'agir trop tard. En outre, l'expérimentation peut être encouragée également, au cas par cas, surtout pour les propriétaires déjà portés vers l'innovation et si la propriété le permet (cela nous semble en effet plus compliqué dans des propriétés de très petite superficie). Ce type de sensibilisation sur les actions concrètes possibles, dans l'optique de l'approche de gestion adaptative, permettrait possiblement d'augmenter la perception de la capacité d'adaptation personnelle qui est faible chez certains propriétaires et qui constitue, comme nous l'avons vu dans notre enquête, un facteur important de l'action.

En d'autres mots, la responsabilisation des propriétaires en la matière constitue un point-clé. De plus, ce genre de communication « positive » permettrait de régler une partie du délicat arbitrage auquel les acteurs de sensibilisation sont confrontés, c'est-à-dire le fait de sensibiliser sur plusieurs enjeux de la gestion forestière, y compris celui des changements climatiques, tout en ne décourageant pas le propriétaire en lui exposant une longue série de risques (entretien SRFB). En effet, il ne faut pas oublier que le premier enjeu de la forêt privée en Wallonie est sa gestion tout court, dans laquelle la donnée changements climatiques doit bien sûr être intégrée, dans un contexte où la propriété privée est extrêmement morcelée et ainsi soumise à de nombreuses difficultés de gestion. Sensibiliser sur les changements climatiques et les possibilités d'adaptation nécessite par conséquent de parler également en termes d'opportunités, c'est-à-dire de mettre en avant les avantages des mesures d'adaptation précoces et notamment en rattachant ces avantages aux fonctions qui tiennent à cœur aux propriétaires : les fonctions patrimoniales (transmettre une forêt en bon état aux descendants), de plaisir (innovation), économiques (mesures d'adaptation pas plus chères), de nature (préservation de la biodiversité) etc.

Dans un futur (très) proche, et pour mettre en œuvre certaines réflexions que nous venons d'exposer, il nous semble que la sortie du plan wallon d'adaptation, qui met en lumière les impacts à craindre issus des changements climatiques sur la forêt et des pistes d'adaptation, constitue une bonne opportunité pour lancer une stratégie de communication à large portée sur le sujet, et ce auprès des fédérations des professionnels du secteur et des associations comme la SRFB qui rassemblent une série d'acteurs de la forêt. Ces propositions sont d'ailleurs tout à fait cohérentes avec l'objectif de créer des outils de sensibilisation des gestionnaires forestiers, déclaré dans l'étude préparatoire au plan wallon d'adaptation (Région wallonne, Agence wallonne de l'air et du climat, 2011, p133).

4.2. Instruments financiers

Il semble que le régime de subsides actif dans le précédent Code forestier, pour les plantations de feuillus principalement, a permis à certains propriétaires de faciliter la mise en œuvre du mélange d'essences, voire a joué un rôle dans cette décision. Nous pouvons donc nous demander si la piste des subsides devrait être envisagée pour encourager différentes mesures d'adaptation.

Bien sûr, cela nécessiterait une réflexion sur l'opérationnalisation d'un tel régime de

subsidés, en fonction des mesures que l'on souhaite promouvoir en priorité ainsi que des moyens financiers et humains disponibles.

Or, la gestion forestière adaptative nécessite une flexibilité dans les mesures mises en œuvre, ce qui ne facilite pas le choix des subsides à privilégier, ceux-ci étant souvent soumis à des conditions d'octroi assez précises. De plus, le contexte des finances publiques actuel n'est pas favorable à la création de nouveaux subsides.

Le public-cible est également important à prendre en compte, sachant que les grandes propriétaires seraient plus tentés et plus aptes à recourir aux subsides que les petits (Colson et al, 2004). Le pouvoir attractif différencié des subsides en gestion forestière a également été démontré dans d'autres études sur les propriétaires privés, notamment au Royaume-Uni (Lawrence et al, 2010). En effet, comme mentionné par une partie de nos interviewés, différentes raisons peuvent décourager les propriétaires à faire appel aux subsides comme la perception de lourdeurs administratives trop importantes par rapport à l'avantage attendu et le sentiment de perte de maîtrise et de liberté de la gestion. De plus, outre ces raisons, on peut imaginer que les petits propriétaires isolés ou moins impliqués dans leur gestion seront d'autant moins susceptibles de profiter de ces incitants financiers, de par un manque de connaissance de ceux-ci.

Bref, il apparaît que seule une partie des propriétaires privés pourraient être incitée par les subsides même si cette option de doit pas être rejetée a priori.

4.3. Instruments réglementaires

Il est difficile, selon nous, d'envisager l'introduction de mesures contraignantes d'adaptation aux changements climatiques. D'une part, la logique du cas par cas et de gestion adaptative progressive ne semble pas vraiment compatible avec la technique du « bâton » qui doit cibler de manière précise des actions à interdire ou promouvoir. De plus, les propriétaires forestiers privés considèrent qu'ils sont déjà soumis à une série de contraintes réglementaires, les augmenter n'aurait sans doute pas un effet positif sur leur motivation à s'adapter.

Cependant, l'intégration de la problématique de l'adaptation au sein des réglementations existantes est primordiale pour éviter les incohérences et promouvoir plutôt les synergies entre les objectifs de la gestion forestière. Ainsi, même si Natura 2000 vise en priorité la conservation de la biodiversité qui constitue en soi un élément de la résilience des écosystèmes forestiers, une réflexion plus systématique concernant l'articulation de cette réglementation avec les objectifs d'adaptation semble essentielle. Plus spécifiquement, l'interdiction des essences non indigènes dans certaines unités de gestion devrait être communiquée aux propriétaires qui ne comprennent pas cette mesure et la considèrent comme un frein à la diversité d'essences.

Enfin, il s'agit d'intégrer les nouvelles connaissances aux réglementations et outils de gestion forestières, ce sera en partie le cas quand le fichier écologique des essences et le guide de boisement seront adaptés aux projections des évolutions climatiques (prévu par l'Accord-Cadre de recherche et de vulgarisation forestière).

Conclusion

Cette analyse de la problématique de l'adaptation aux changements climatiques au sein du contexte spécifique de la gestion forestière par les propriétaires privés en Wallonie montre bien l'intérêt d'une approche multi- voire interdisciplinaire.

En effet, notre acceptation large du concept de capacité d'adaptation à travers une attention à un ensemble de facteurs à la fois objectifs et subjectifs, techniques et non-techniques, met en lumière l'intérêt de connecter les résultats de la recherche scientifique forestière, nécessaire pour investiguer les réactions des écosystèmes face aux changements climatiques et les possibles mesures pour s'y adapter, avec des recherches de sciences humaines et sociales orientées vers la compréhension des acteurs chargés de mettre en place ces mesures.

Un dialogue et une ouverture disciplinaire de part et d'autre sont donc nécessaires pour tenter d'appréhender une problématique aussi multidimensionnelle que celle de l'adaptation aux changements climatiques.

Bibliographie

- Adger, W. N., Agrawala, S., Mirza, M. M. Q., Conde, C., O'Brien, K., Pulhin, J., et al., 2007 "Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity" in Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E., (Eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 717-743.
- Bleda, M., Shackley, S., 2008, "The dynamics of belief in climate change and its risks in business organisations" in *Ecological Economics*, 66, 517-532.
- Colson V, Puissant, T., Hebert, J., Rondeux, J., 2004, « La forêt privée wallonne et sa gestion : des chiffres qui parlent », les cahiers forestiers de Gembloux » n°31.
- Fankhauser, S., et al., 1999, « Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions » in *Ecological Economics*, 30, 67–78.
- GIEC, 2001, *Changement Climatiques 2001 Rapport de synthèse, Annexe B: Glossaire*, 173-197.
- Grothmann, T, Patt, A., 2003, "Adaptive capacity and human cognition", presentation at the Meeting of the Global Environmental Change Research Community, Montreal, 16-18 October 2003.
- Grothmann, T., Patt, A., 2005, « Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change" in *Global Environmental Change*, 15, 199-213.
- Laurent, C., Perrin, D. (coords.), Bemelmans, D., Carnol, M., Claessens, H., de Cannière, C., François, L., Gérard, E., Grégoire, J.-C., Herman, M., Marbaix, P., Peremans, V., Ponette, Q., Quévy, B., Rondeux, J., Sérusiaux, E., van Ypersele, J.-P., Vincke, C., 2009, *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs et aux propriétaires et gestionnaires, Rapport final du groupe de travail « forêt et changement climatique*.
- Lawrence, A., Dandy, N., Urquhart, J., 2010, *Landowners' attitudes to woodland creation and management in the UK. Review of current evidence*, The Research Agency of Forestry Commission.
- Lirio-García, R., 2012, *Analyse qualitative de l'évolution du nombre de propriétaires forestiers privés engagés dans la certification PEFC, Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de bachelier en agronomie, Haute Ecole provinciale de Hainaut Condorcet*.
- Marshall, N.A., 2010, "Understanding social resilience to climate variability in primary enterprises and industries" in *Global Environmental Change*, 36-43.
- Naturawal asbl, 2010, *Enquêtes auprès des agriculteurs et des forestiers des sites Natura 2000*, Sonecom.
- Région wallonne, Agence wallonne de l'air et du climat, 2011, *L'adaptation au changement climatique en région wallonne, Rapport final*, 31 mai 2011.
- Société royale forestière de Belgique (SRFB), 2011, "Changement climatique. Adapter la sylviculture" in *Silva Belgica*, n°3/2011, 18-21.
- Smit, J.B., Pilifosova, O., 2003, "From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction" in Smit, J.B., Klein, R.J.T., Hug, S., 2003, *Climate Change, Adaptive Capacity*

and Development, Imperial College Press, London, 9-29.

Smit, B., Wandel, J., 2006. "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability" in *Global Environmental Change*, 16, 282-292.

Tompkins, E.L., Adger, W.N., Boyd, E., Nicholson-Cole, S., Weatherhead, K., Arnell, N., 2010, "Observed adaptation to climate change: UK evidence of transition to a well-adapting society" in *Global Environmental Change*, 20-4, 627-635.

Triggers and barriers to energy/carbon efficiency measures in the ceramic, cement and lime sectors

Frank VENMANS

Frank.venmans@umons.ac.be
Researcher Waroqué Faculty Economics and Management, UMONS
17 Place Waroqué, 7000 Mons

1. The energy efficiency paradox and the definition of barriers

Since the oil shocks in 1973 and 1979, there has been an intense academic debate around the energy efficiency gap. The International Energy Agency's world outlook (IEA 2012) estimates that economic viable energy efficiency measures have the potential to halve the world primary energy demand increase by 2035 compared to the actual 'New Policies Scenario' which already includes the current energy efficiency policies. Many other studies find important cost-effective unrealized investments opportunities in energy-efficiency (De Canio 1998; Van Soest & Bulte 2001; Sorrell et al. 2004; Sola & Xavier 2007, Sardanou 2008, Schleich 2009, Moya et al. 2011, Abdelaziz et al. 2011).

There is a high consensus on the existence of classical barriers to energy efficiency such as externalities, asymmetric information and incompleteness of contracts. However, other barriers, such as organizational barriers and capital availability, and with it the size of the energy efficiency gap, has been a polemic academic topic.

Orthodox economists argue that important hidden costs (hidden to the analyst, but not to the firms) explain a big part of an apparent energy efficiency gap. Stavins et al. (2007) express very well the more economic orthodox stance.

"One group, sometimes referred to as "technologists," asserts that numerous market barriers impede widespread adoption of (energy efficient) technologies. Moreover, they assert that government initiatives to overcome these barriers and thereby improve energy efficiency could reduce emissions and also realize substantial cost savings through resulting reductions in energy expenditures. On the other hand, most economists maintain that, while technology diffusion is typically a gradual process, energy efficiency improvements that truly yield cost savings largely will be adopted without the need for government intervention. Moreover, economists note that many of the barriers that slow or prevent broader adoption of more energy-efficient technologies reflect real economic costs associated with their adoption. Where this is the case, policy intervention that requires or encourages adoption of those technologies would be socially costly. However, some of the barriers inhibiting technology adoption reflect true market failures that, if corrected, may both improve energy efficiency and yield economic gains." (Stavins et al. 2007 p11 also Sutherland 1996, Jaffe et al. 1999, 2004)

According to this view, uncertainty is seen as inherent to new technology adaption and thus not subject to policy intervention. Another example of an efficient market response is capital availability. *"Capital markets certainly constrain the allocation of capital, particularly to more risky borrowers, but this allocation is a source of efficiency, not inefficiency. Furthermore,*

there is no reason to believe that capital markets systematically misallocate capital in ways that discriminate against energy conservation investments.” (Sutherland 1996). They conclude that policy intervention is only justified when there are classical market failures, such as negative externalities and asymmetric information.

Following Sorrell et al. (2004), we define economic efficiency in a broader way than the orthodox stance that sees cost-efficiency as the outcome of markets under the absence of market failures. Sorrell et al. (2004) enlarge the orthodox vision to transaction cost economics (TCE) and behavioural economics. TCE stresses the importance of routines and rules of thumb and satisfactory rather than optimal decisions in order to reduce the cost of making complex decisions (Williamson, 2002). Behavioural economics departs from the assumption of rational agents, pointing at systematic biases in human decision-making (Kahneman and Tversky 2000). Certain barriers that are considered non-failures by orthodox economics may be considered as barriers by transaction cost economics and behavioural economics (Sorrell et al. 2004, also Weber 1997). The cost of information gathering, which may be seen as a hidden cost justifying the apparent efficiency gap in an orthodox economic framework (Jaffe et al. 2004 p.84), may be reduced by subcontracting with a specialized audit bureau or by a policy imposing energy efficiency labelling. If actors treat risk in investment decisions in a biased way according to prospect theory, then the risked nature of a project may become a market failure.

Corporate cultures exhibit a rich diversity of forms and show large variations in performance. Managers wrestle with the complicated challenge of getting the most out of the resources they deploy. Dealing with problems of agency, moral hazard, imperfect or asymmetrical information, incentive design is at the heart of modern management. These difficulties affect all aspects of the firm including capital structure, investment budgeting, operational control, strategic positioning as well as investment decisions related to energy efficiency. This contrasts with the assumption of the neo-classical stance that under competitive market conditions firms can be expected to rationally maximise their value and find a governance structure such that organizational barriers to profitable investments are negligible. DeCanio (1998) finds statistical evidence of organizational and bureaucratic barriers among 1400 US-firms participating in an efficient lightning program. Several other qualitative studies, focussed on organizational barriers to energy efficiency in firms (DeCanio 1993, Zilahy 2004, Sola & Xavier 2007, Sardianou 2008).

We follow the classification of Sorrell et al. (2004), which is also followed by Fleiter et al. (2011), Schleich (2009), Schleich and Gruber (2006) distinguishing the following energy efficiency barriers:

- Hidden costs
- Risk and uncertainty
- Imperfect information
- Access to capital
- Split incentives
- Bounded rationality

As explained above, these barriers can be understood from orthodox, transaction costs and behavioural perspectives.

We study barriers and motivations in the ceramic, cement and lime industries which are very energy intensive and carbon intensive industries. This is to our best knowledge the first study on energy efficiency barriers in these sectors. Moreover, there are only a few papers on barriers to energy efficiency in energy-intensive industries (de Groot et al. 2001, Sardianou

2008, Zilhany 2009). Energy-intensive industries are of particular interest not only because potential efficiency gains concern big quantities, but also because many studies explain barriers by the fact that energy is not part of their core business (Sorrell et al. 2004, Schleich and Gruber 2006).

The ceramic, cement and lime sector are regulated by the European Union Emission Trading Scheme (EU ETS), which is a cap and trade system covering big industrial installations in the EU. During the first (2005-2007) and second (2008-2012) period of the EU ETS, all companies included in the study received more free emission rights than their real emissions. The carbon price during this period was very volatile with prices above 20 €/t CO₂ at the beginning of both periods and very low prices at the end of both periods. From 2009 until 2011, the price was relatively stable around 15 €/t CO₂. So for the major part of the period, for a carbon price at 15€/t, the carbon market increased the profitability of gas efficiency investments by 10% and coal efficiency by 50%.¹

All investigated companies are part of the EU ETS and all had freely allocated emission allowances above verified emissions. In this case, extra profitability from the ETS for efficiency investments stems from (potential) extra sales of emission rights. In the case of free allocation below real emissions this extra profitability is induced by reduced purchases of emission rights. However, the marginal effect of the ETS on the profitability of efficiency measures doesn't depend on the amount of free allocation.

Besides the EU ETS, the energy efficiency is also regulated by a voluntary agreement with the regional Flemish and Wallonian regional government. Both programs are similar, so we will not focus on the minor differences between both voluntary agreements. Between 2003 and 2005, energy audits, subsidised at 75% instead of the usual 50%, had been conducted in all energy-intensive plants. Energy efficiency investments were categorised according to two dimensions: profitability and feasibility. Participating companies agreed to realise all investments with available technology and certain feasibility with a payback time below 5 years and all investments with an available technology but uncertain feasibility with a payback time below 2 years. As a counterpart, participating companies were imposed a lower amount of green certificates on their electricity consumption.² The financial incentive to participate into the program is around one euro per abated tonne of CO₂, which is low compared to the price signal induced by the carbon market.³ Only two local brick industries were not part of the voluntary agreement.

In part 2 we discuss the methodology and data, followed by the results of the 6 above-mentioned barriers. Next we evaluate the impact of the EU ETS and voluntary agreement on efficiency investment. Part 5 concludes.

2. Methodology and data

Barriers are contextual and evolving over time, difficult to identify accurately (Verbruggen *et al.*, 2010). Based on a qualitative methodology we study the decision-making process leading to energy saving investments, looking at a large number of decisional factors, not only profitability, but also risk, reliable information, available capital, organisational structures, structure of contracts...

1 Methane=0.198 t CO₂/MWh and around 25 €/MWh for industrial use. Coal= approximately 3 t CO₂/ton coal and 90€/t.

2 Moreover, companies received lower excise on fuels. This advantage is not applicable for the ceramic, cement and lime sectors because they do not pay excise on fuels anyway.

3 All advantages taken together in 2006 accounted for an estimated 12.2 - 17.3€ million avoiding 183 million GJ and 13.5 million tons of CO₂.

All but 2 groups of the Belgian construction materials sector are included: 9 Belgian brick producing companies or groups, three companies producing other baked construction materials, two cement and two lime producing groups. To our best knowledge, this is the first energy efficiency study covering an entire country-wide sector for over 95%. The size of the companies is very diverse. On the one hand, nine investigated plants are part of a multinational corporation (MNC) with a worldwide turnover above one billion euro. On the other hand, seven investigated plants are only based in Belgium (with one exception of a small Dutch-Belgian group). These national groups have a turnover below 100 million euro.

Table 1. Characterisation of interviewed plants according to international scope, turnover and emission allocation

	Part of MNC with consolidated turnover > 1 billion €	Not part of MNC with turnover < 100 million €	Range of yearly allocated emissions per plant (t CO ₂)	Fuel	% CO ₂ emissions from decalcination	Belgian production 2009-2011 compared to 2006-2008 ¹	Belgian net exports 2011 as % of production ¹
Bricks	3	6	10.000-80.000	Natural gas	Generally below 5% Exceptionally up to 50%	-16%	15%
Other construction materials	2	1	30.000-70.000	2 Natural gas 1 petroleum cokes	Between 5% and 50%	n.a.	n.a.
Cement & Lime	4	0	400.000-1.500.000	coal/ Lignite/ waste/ biomass	Above 60%	Cement -10% Lime -10% ²	Cement 5% Lime positive ³

¹ Annual Report 2011 Fédération Belge de la Brique, Febelcem, Fediex

² Based on limestone extraction

³ Exact numbers are not available

For every company, 29 motivations and barriers are discussed for the 3 or 4 most relevant past of future potential investments in energy/carbon efficiency. In total, 53 energy efficiency projects (34 realised and 19 potential future) were discussed in detail.

Beside 21 plant managers or environment managers, who all were responsible for investments with energy efficiency gains of several millions of euros, 4 persons from the professional federations and one person from an equipment supplier were interviewed. Interviews lasted between 1h15' and 2h. Texts were transcribed and structured with NVIVO. Since we have virtually all production groups, we have no selection bias. Information from annual reports, when available, and follow-up reports from the voluntary agreement were also included.

The bricks, cement and lime sector are important sectors in the Belgian economy. Belgium is a net exporter of bricks, cement and lime. The investigated companies emit around 15% of Belgian ETS covered emissions. During the crisis period 2009-2011, the Belgian production of construction materials decreased (table 1). Note that in 2011, the year before the interviews, production in the cement and lime sector approached again levels of before the crisis.

Different studies describe the potential for efficiency measures and best available techniques in the ceramic sector (Agrafiotis & Tsoutsos 2001, Barros et al. 2007, Bref 2007, Zakharov et al. 2009), in the cement sector (Bref 2010, Madloul et al. 2011, Pardo et al. 2011, Moya et al. 2011) as well as in the lime sector (Bref 2010). These studies helped to orientate questions about the realized and potential efficiency measures.

3. Results

Annex 2 and 3 show the relative importance of motivations and barriers for the companies in general, for investigated realised projects and for investigated potential future projects.

Hidden costs

In general, payback times or internal rates of return (IRR) are calculated in the first place to ordinate projects, not to evaluate whether the return is higher than the cost of capital. In this sense firms do not focus on hidden costs that are difficult to estimate but can be deemed common for all projects.

Overhead energy management costs, costs of production interruptions, hassle, inconvenience, are typically not included in payback times. However, most investments such as upgrading kilns and dryers, facilitate energy management, lower maintenance cost and increase product quality. Indeed, the factor 'risk of production disruption, hassle, inconvenience' obtained a low score of 0,62 (annex 2). Reported scores are the mean of the following ordinal values: very important=3; important=2; moderately important=1; not important=0.

Costs of studying investment opportunities and analysing cost effectiveness are also typically not included in profitability calculations. However, since they are sunk costs, once these costs are incurred, they do not justify a higher required IRR from a theoretic point of view. However, they may justify not investigating certain opportunities *ex ante*. Costs of retraining or hiring new personnel are not important as expressed by the low score of 0.54 on this barrier.

A few interviewees mentioned specific hidden costs that are not negligible and not included in payback calculations:

"If you have 15 motors in an installation, then you have to consider what happens when a motor shuts down. Can you stop your installation for 2 days or do you need changing parts in house? That is typically something you dwell on when the installation is running."

Certain advantages of investments were not included as well. A typical example was that no single brick producer included the advantage of carbon credits from the EU ETS in its payback or IRR calculations. For a biomass project, the gain of learning not included in the payback time, justifying a longer payback time.

"There we are in an investment in a kind of prototype in order to learn and there we talk about payback times of 10 years of more."

Another example is that energy prices are estimated at actual prices, which do not include increasing energy price trends.

But in general, the perception of interviewees is that hidden costs are very limited when they calculate the profitability of energy efficiency projects.

"Are there costs that you don't integrate in IRR calculations because they are difficult to estimate? And may this be compensated by a higher required IRR? Do you sometimes lack analysis?" "In general we analyse things in a very detailed and thorough matter and we do not have uncertainty...(Even if overhead costs are not included) "Are there provisions for hassle, inconvenience? For example the project X has failed ?" "That's all included, we try to minimise (risk), to have correct commercial projections (for demand and prices) , we do it pretty well."

Risk and uncertainty

In theory, profitability estimates are based on expected values of cash flows, i.e. uncertain but unbiased estimates of costs and incomes. If one assumes efficient capital markets where investors possess a diversified portfolio of equity, then only uncertainty (volatility) correlated with the market return is relevant. If investors do not have a diversified portfolio, (which is the case for several family owned business in our sample), the notion of risk of a project is the extent to which the project affects the volatility of the profit of the entire company. So not only the level of uncertainty of the project is important, but also the correlation with the overall profit rate because uncorrelated uncertainty is diversifiable, i.e. compensated by other projects that have higher/lower return than expected. Note that the gains from a project are part of the overall profits such that very important investments are stronger correlated to the overall profit.

The point that correlation with overall profit rate or market return is important may explain why the most important risk that came out of the study was "Low demand risk: investments entail fixed costs that may be cost-inefficient when there is overcapacity during economic downturns." This barrier ranked second obtaining an overall score of 1.20 (between moderately important and important). Future demand is highly dependent on the business cycle, especially for the construction materials sector. In one company a production level at 50%-60% of capacity led to a complete investment stop over the last 10 years.

In most cases however, profitability estimates (payback time or IRR) are not based on unbiased expected values of cash flows. Only 3 companies mentioned the use of an optimistic and pessimistic scenario for the calculation of their or payback time or IRR. Since the uncertainty of cash flows is difficult to estimate, certain companies use cash flows of a scenario without setbacks and thus calculate a payback time or IRR of an optimist case scenario. So the risk of a project is downside risk where the expected value of a worse outcome is more important than the expected value of a better-than-estimated outcome. As such the estimation error is not mean-neutral and can be seen as a special case of a hidden cost justifying a higher hurdle rate to trigger the investment. Only three of the 34 evaluated realized projects had setbacks creating losses instead of gains.

Sometimes unknown future decisions may decrease the expected gains of the investment. For example if a plant is completely rebuilt or shuts down, the retrofit investment is lost. This is clear from the following interviewee:

"Solar panels are somewhat like a long term asset acquisition. While for investment in energy where you have to start changing conducts and heat exchangers will be questioned with more suspicion. Such as: is it going to work and is that payback time really 4 years?... Solar panels lay on the roof and you are virtually sure about it: at that time it will be paid back... Even if you throw everything out of that hall, the solar panels will stay on the roof and continue to produce electricity and make money. Nobody will be bothered by them. But when you make a new investment in efficiency

and X years later you want to introduce a big modernisation, then you've lost your heat recycling system... And then you arrive at what most of the companies say: if you do the investment, we prefer a payback time of 2 or 3 years, because that's the horizon that I can foresee. But if you then think about 5, 6 or 7 years payback time, nobody does that... The market changes so fast that we don't know what we will be doing in 5 years.

Profitability measures are typically calculated in a static approach, which is exact for investments that cannot be postponed. Uncertainty of outcomes without trend, like cited above, do not create a gain in waiting because the expected outcome in the future will be the same as the expected outcome today. However, if the expected outcome increases over time, like in the case of rapid technology improvement, firms may have a gain in waiting, justifying the inclusion of an option value in the NPV calculation (Van Soest & Bulte 2001, Ansar and Sparks 2009). This was perceived to be of low importance however, because most measures concerned relatively mature technologies explaining why the barrier "We have waited (wait) to see if the application of the technology by other companies/plants turned (turns) out to be reliable and profitable" ranked only 11th (score 0.6). Also the motivation "the technology has become cheaper" was the before-last motivation (score 0.6). Only one company gave an example of a gain of waiting in the case of software packages that come out every few years :

"We may accept a given payback time, but if we can decrease that by purchasing the software that realizes the same thing 2 years later, we should take that into account."

Option value stemming from energy price uncertainty is a controversial topic. Hassett and Metcalf (1993) calculate that option value of energy price uncertainty would justify a hurdle rate that is 4 times higher than in a static approach. But Sanstad et al. (1995) argue that the results of Hassett & Metcalf only holds for static hurdle rates of 1.6% and are fairly low for more realistic hurdle rates. Note that both studies contradict with Sutherland (1996), arguing that volatile energy prices are an incentive for energy efficiency -not a barrier- because it is the price-volatility of the remaining energy that motivates a company, not the price-volatility of the avoided energy consumption. Energy efficiency decreases the exposure to energy price uncertainty. This was observed for the carbon price, which has a comparable impact on companies costs. Reducing the risk of the carbon market was a motivation with a relatively high score of 0.9, almost as important as the expected gain of the carbon market (score 1.1).

No single company mentioned the inclusion of option values in the calculation of profitability of investments. Beside the fact that for most investments uncertainty did not evolve much over time, Wambach (2000) argues that the popularity of the payback criterion or IRR –which are conceptually less appealing than net present value (NPV)- may be explained by the fact that they are less affected by option values.

In two companies where a future plant closure was an option, investments were restricted to investments that were strictly necessary to continue operations. In the first case the (former) plant manager didn't know if there would be a successor. In the second case, losses during the former years, and a repositioning of the mother company opened the option to sell the division. Investment opportunities with payback times of 1 or 2 years were not realized because of this uncertainty, even if the option of selling or stopping was likely not to happen during the payback time.

Energy efficiency investments may also reduce risk. Since energy efficiency is not only a matter of investments but also a process of learning, efficiency investments decrease the risk of becoming a laggard and having uncompetitive production costs. Many energy efficiency investments, increase product quality and thus again reduced the risk of not keeping up with market trend toward higher quality products.

To conclude, the risk of energy efficiency investments was generally perceived to be low, because most of the investments concerned known technologies and when R&D and learning was required, the obtained knowledge was mostly considered as a valuable asset for future strategic positioning.

Imperfect information

Concerning information on energy flows, interviewees said to have a good view on the energy consumption of different components of the plants. Energy sub-metering is widely applied, with the exception of 2 plants that had only one gas meter. But in general sub-metering has been improved a lot during the last decade and is recognised as a very useful tool to find energy efficiency opportunities and assess energy efficiency of new equipment *ex post*.

Certain investments, such as variable speed drivers, have certified energy efficiency that is transparent, even if labelled efficiency decreases with the age of the motor. For other investments, *ex-ante* information on energy efficiency of new equipment or modified production processes is difficult to estimate. "Lack of reliable information to be able to estimate feasibility/profitability" ranked the 6th barrier (score 0.84). This is especially the case when new plant-specific equipment needs to be designed, such as upgrades of kilns and dryers or decreased moisture content.

"So we said, we'll make it one channel, we close all leaks, and that brought us where we stand now, which is 20% less electricity consumption. But that never was the initial aim, that we would obtain 20%. We did know that we would be obtain something, but how much, we didn't know at all."

"Did you have a view on the energy gains of your upgraded kiln?" There were insufficient data to demonstrate that. We said: energetically it can only be better than what we have now... and we know of course what is our energy factor in our total costs. So we had an idea about it, we knew we would come out (result) better in any case. But it hasn't been calculated exactly." "Lack of reliable information?" "There wasn't any as a matter of fact, that was a disadvantage for us."

Even if an entire part of the plant is renewed, the energy savings may be difficult to assess as is clear from the following quote:

"For the new dryer, we did calculate a payback time, but for the new kiln it wasn't the case. Because it is difficult, very difficult... We know that if we build that kiln and we can sell the bricks, that we will recover the investment in 5 or 6 years. But it could well be that by commanding the kiln to another supplier with a lower energy consumption that we recover the investment earlier. The specific energy consumption is never included in the payback time. Never."

Ex-post energy efficiency of new equipment and measures has increased by sub-metering which is in many cases followed up continuously. But still, variable production conditions make even *ex-post* efficiency assessment difficult.

"According to me it is unverifiable because it depends so much on the production volume of the plant, which depends on the economic context. You can see it at the sectoral level: when we are in an economic downturn the energetic indices deteriorate and vice versa"

"The voluntary agreement has revealed (highlighted) the complexity of the profitability of an investment. When we take the initial list, the one will deliver for example 1% energy savings, 2% energy savings for another ... We did dozens of investments and overall, our energy consumption doesn't decrease. It doesn't decrease at all, you cannot see it. Why? Because these are very small gains. And because our kilns consume 80% of our energy, while their consumption over their lifetime is not linear. In some way, when one says they consume that much GJ per ton, this increases over time." "This is not a question of bad measurement?" "No" "Is it because it is submerged by the rest?" "It is submerged by the rest." "So small that it is unobservable?" "It is unobservable" "but you have theoretic arguments to say that the gains are real?" "On theoretic bases, yes."

Imperfect information increases the uncertainty on the future gains and thus the risk profile of efficiency projects. However, "Lack of reliable information to be able to estimate feasibility/profitability" (score 0.84) ranked lower than the fact that the option simply wasn't studied before. "The technological feasibility hasn't been studied before" ranked 3rd (score 1.2) and "the profitability wasn't studied before" ranked 5th (score 0.85). One explanation for not studying investment opportunities may be "Lack of time of management" which was perceived as a moderately important barrier (rank 7, score 0.78), contrarily to other studies in less energy intensive sectors (Sorrell et al. 2004).

Of course you need persons that look after it, who pull the project forward and who foster the project, defend it and go for it. So why [didn't we invest] earlier... it is somewhat capacity" ... "lack of time for management?" "that's a lasting (permanent) problem. We save costs, and what costs do you save? Personnel. And in the long run everybody has to choose what he can take up (look after)."

The fact that not studying an opportunity is a barrier, also points to the role of routines, as is clear from the following quote.

"So before the voluntary agreement, why were cost savings not transparent?" "I think, these companies have made in the past gigantic profits and so there was no trigger to change. When everything goes very well and the profits come in, why make big changes? An extra person in the production didn't bother anybody either."

Table 2. Relative perceived usefulness of information. Scores are the mean of the following ordinal values: Excellent=4; good=3; average=2; poor=1; don't use=0.

Colleagues within the company	3,14
Technical seminars	2,55
Network of contacts in the sector	2,55
Equipment suppliers	2,45
Technical journals	2,09
Professional associations	1,91
Consultants	1,73
BREF (IPPC Reference document on Best Available Techniques)	1,30
Publicly funded demonstration projects	1,09

Interviewees were asked to indicate the importance of different sources of information (Table 2). Palm & Thollander (2010) argue that barriers to energy efficiency are embedded

in a socio-technical regime and that the adoption of new energy efficient technologies often contradicts with existing norms, perceptions, tacit knowledge and institutional rules. Indeed information sources that don't pass the frontiers of the socio-technical regime, such as colleagues, network in the sector and equipment suppliers rank first, second and fourth respectively. However, technical seminars (rank 2) and technical journals (rank 5), which are more likely to allow for exchange of information from different technological regimes were also important. All brick producers were member of the TCKI, a Holland-based ceramic technology centre. They worked on a project of 'the kiln of the future' fostering path-breaking future developments. They also organised seminars on cogeneration which is a controversial because successfully deployed by 2 firms and perceived as unprofitable by others.

Split incentives

Asymmetric information between a buyer and seller on the quality of a good may lead to adverse selection, like the seminal paper by Akerlof (1970) described for the market of lemons. Since energy efficiency of new equipment may be difficult to observe for a purchasing company, this may impede technology suppliers from selling the most efficient equipment and may even drive the most efficient equipment out of the market (Sorrell et al. 2004, Sorrell 2009).

When the equipment is standardised and energy efficiency is labelled such as for new motors or certain grinders, energy efficiency is transparent and room for split incentives is limited. In most cases however, equipment is plant-specific and build on-site by subcontractors. We encountered different cases with increasing potential for split incentives.

In the first case, the company does the design and the subcontractor builds equipment along a highly specified plan like for a new channel for hot air, or installations that are highly dependent on R&D from the firm. As design is determined by the principal (purchasing company), there is no agency problem.

In the second case, which was encountered most often, the subcontractor does the design and energy efficiency is part of the contract under standardized theoretic conditions, that are however difficult to enforce. This is generally the case for new kilns, cogeneration installations, entirely new designs for heat transfer from kiln to dryers. However even if energy efficiency is not enforceable, its transparency is increased by an intense interaction between staff of the purchasing company and the subcontractor.

"In principle you go to different kiln builders, you start tendering according to capacity, temperature etc, and then you see specific energy consumption in these offers. And then you see big differences. So you start talking, how do you get this result, how do you get that result. And then you see that one is more advanced with his technological concept. So you say, we want to get the specific energy consumption down, what can you do about it? And then a given story comes up: this is the maximum that we can get, but we'll need to add a burner, add a ventilator, add insulation, and then we can guarantee that specific energy consumption."

Finally, the interviewee didn't chose for the technologically most advanced supplier, but negotiated an upgraded design with a cheaper supplier. He probably could take advantage of having worked on an efficiency research project, but many of the interviewed managers had comparable high levels of technical knowledge. So contractual energy performance, combined with theoretical insights from the design, the phenomenon that the subcontractor delivers a product for which the efficiency is unobserved by the buyer can be assumed limited.

In the third case, the subcontractor does the design and energy efficiency is not contractually fixed and only estimated by the subcontractor and/or indirectly deducible from technical specifications and/or based on confidence.

"In the contract with the kiln supplier, is energy efficiency part of it?" "No" "So it isn't legally enforceable... is it based on prestige of the brand, based on confidence?" "Indeed confidence, how can I say it, who wants to renovate an old kiln? It must be somebody that has experience. You can indeed go to a renowned firm, but they will offer you a new kiln, en will do less effort to completely renovate something existing. So we contracted with a firm who could show us different kiln renovations they had done before. Concerning energy consumption, we have relied on what this man could tell us about how many burners, baking time and what he thinks from his experience what will be the specific energy consumption."

Even for an entire new plant, energy efficiency may be unclear.

"Do you know how many energy your new bricks will need?" "No, we know our consumption in the past, but what it will be, we completely don't know. There are certain agreements, certain guarantees that the deliverer needs to honour, but it ends there as a matter of fact."

Information based on reputation can be assumed to have an important role enforced by the fact that equipment suppliers are part of a 'small world'. For big investments, tendering takes place with two, three or four equipment suppliers. Moreover, all brick producers are member of the TCKI, an applied research institute for the ceramic sector, who may provide information on the technical capacity of equipment suppliers. This was certainly helpful for the brick companies that weren't part of big transnational corporations and don't have their own research centres.

Another documented case of split incentives that may entail lower efficiency designs is overkill because subcontractors want to avoid litigation by providing higher than rational capacity margins. Most of the interviewees didn't recognize overkill from subcontracting to be an important problem, because they have knowledge to discuss technical specifications with the subcontractors. However, some managers recognized overkill from subcontracting, even if this was not in the design of core plant elements such as kilns and dryers.

"Ventilation, cooling, heating... a lot of overkill. For heating of the halls we have run a 600kW installation. Can you imagine that the standard central heating of a house is 40 kW? ... Actually, the architect doesn't know anything of heating. The architect designs the size of the spaces, the thickness, hight. And than we are asked how many degrees we want. 20? Ok, but 20 or 21 or 16 that's a big difference... The contractor decides the capacity of the boiler based on the data that we have given him. But what do you see in the calculations? Everything is based on those times that it is -10°C outside. So there is indeed a lot of overkill."

"Absolutely true, I can give a lot of examples. For example construction of decks (of kilns). They want to hedge against all possible outcomes, you see it regularly."

Split incentives within the company, between different departments or persons entail barriers that are perceived as unimportant by managers. "Conflicts of interests within the company", "Individuals/departments are not accountable for energy" and "energy manager lacks influence" were the 3 barriers with the lowest importance among all questioned barriers. Since energy is part of the core business of the plant, plant managers were highly involved in studying energy saving opportunities.

When conflicts of interest are mentioned they are closely related to competition between investment projects and thus overlap with capital availability:

Conflicts of interest are there of course, yes. For example, we propose to do an investment in one or another equipment or an upgrade, while of course the production manager he wants at that moment to keep his costs as low as possible and he may object it."

As a matter of fact, the only conflicts of interest are investments of all kinds. Investments in energy, investments in machinery, in quality, in product diversity... And energy has to compete with these, and which one will you do first, will it be energy?

Access to capital

"Other (non-energy-related) investments receive(d) prior financing" was the most important invoked reason to delay energy investments (score 1.46). "Difficulties to find (internal or external) financing for investments" was the third most important perceived barrier (score 1.18). But only one company mentioned difficulties to obtain extra bank loans for investment projects, because they had suffered losses over the past years. The other companies had no problem to subscribe new loans at normal market rates, but preferred to invest based on retained earnings, according to the pecking order theory (Meyers & Majluf 1984), especially in the case of family owned groups.

"We are a family owned business. They don't want to contract long term loans... There is another department where an important investment is in the pipeline within a few years. And I think that we now are starting to put money aside to be able to cope with that future investment. So investments that used to take place in other departments will have to present a much better payback time before these investments will be accepted."

For all projects where a payback time or internal rate of return (IRR) was calculated 65% had a payback time of 3 years or lower. The 3 years payback time to get green light for an investment is recognised as a typical rule of thumb for non-compulsory investments by all the companies. A payback time of 3 years for an investment with constant yearly maintenance costs and energy gains lasting 10 years corresponds to an IRR of 31% (or 33% for an installation lasting 20 years, the tendency to underestimate gains in the long run is a disadvantage of IRR compared to NPV). This is much higher than the real weighted average cost of capital (WACC).⁴ These very low payback times are reported by other authors. DeCanio (1998) finds a median payback time of 3.1 years for efficiency lighting investments in 1400 US-firms. Anderson and Newell (2004) find a typical payback time threshold of one to 2 years for 39.920 audited energy efficiency projects in 9034 small and medium US enterprises. They do not conclude however that this payback time is typically lower than for other investments. For investments in general, Summers and Poterba (1995) find average real (constant dollar) hurdle rates of 12.2%, "*distinctly higher than the average rates of return earned by debt or equity holders*".

Jeffre et al. (1999, 2004) and Sutherland (1996) argued that such a low payback time may be cost-effective because of hidden costs or a higher risk profile than the rest of the company. No single interviewee mentioned hidden costs or risk as a justification for low payback times. And as argued above, hidden costs, risk and information costs are unlikely to justify a doubling or tripling of the unbiased payback time, which would be a cost-effective payback time.

⁴ The return on market portfolio is 8.7% between 1947 and 2000 in the US, 9.8% between 1978 and 1999 in Germany and 9.0 between 1973 and 1998 in France (Mehra, 2003). Interest on debt is much lower, decreasing the WACC.

Former studies (Sorrell et al. 2004, DeCanio 1998) suggested that the required profitability for energy saving projects was much more severe because energy was not considered to be part of the core business of the company. In our study no single firm recognized that the required profitability for energy projects was higher than the required profitability of other non-compulsory projects. Moreover, 2 groups had special budgets for energy efficiency and innovation which made investments in energy efficiency slightly easier than other investments.

All interviewees explained the low payback times or high hurdle by capital budgeting.

"Through the discussions of the voluntary agreement they say "Yes, you have a payback time of 2 or 3 years, why don't you do them ?" And it is something they don't want to hear, and we repeat time after time that you need to see the investment capacity in its overall aspect. In groups as ours we have closed investment budgets. And inside these budgets we have to cope with new installations, stay-in-business to keep our installations running and only then we look at what are our priorities. We have quality investments, investments for the security of our personnel etc."

At the same time this group explains that there is no difficulty to obtain extra capital:

"Generally, the group has easy access to capital. It is more a constraint that it imposes itself.. In 2008 we have tightened operational budgets, but the family has reinvested in the company. They have found the necessary financing... so we crossed the period without big problems. Finding capital is not a real problem."

Capital budget discipline is a well described phenomenon in the literature as a way to reduce agency costs between managers and shareholders. Capital is available only for those projects with the highest profitability so that managers cannot misuse capital to enlarge the company at the expense of lower profitability. But it leads to the refusal of investment projects with genuine positive net present value and a possible sub-optimal investment level. Even if energy efficiency is considered as an important question, the fact that they are optional non-compulsory investments, creates a high hurdle rate for energy projects.

The shortsightedness embodied in a 2-year payback or 30% hurdle rate may be not so much a result of defective vision as it is the unintended side-effect of corporate policies put in place for entirely different reasons-to simplify control, create appropriate incentives, of overcome moral hazard... Measures adopted to deal with them may in the past have been the only feasible (second best) solutions, but give the appearance of a failure to fully optimize the productive resources available to the firm. If this is so, innovative management should be able to improve on old methods and move the firm closer to its profitability frontier. (DeCanio 1993)

Bounded rationality

For a minority of the realized projects (18%), no measure of profitability was calculated. Among them a multi-million investment in a completely new plant.

"Do you have any idea of a payback time, IRR, NPV, or is it more feeling?"

"How did I read it again -being somewhat philosophical- if you want to swim across the sea, you need to jump into the water, and that's what we did and we will swim. Only by watching the water you won't cross it. That's somehow how it is..."

"Did you calculate an IRR or another measure of profitability, or a multiple of turnover... do you have a calculation of 2 pages, with a conclusion that you will recover your costs?"

"I think that's not evident. And we hope that we get out of our costs."

For most projects however, a measure of profitability was calculated. However, the importance of studying the technical feasibility or profitability of a measure indicates that routine plays a role. Lack of time (discussed above) is also a rationale for the use of rules of thumb.

No firm worked with net present value, which is however theoretically the most appealing approach. As a rule of thumb, all companies used payback times, sometimes complemented by IRR calculations. These measures do not give information on the optimal level of investment because there is no link with the WACC.

The insight that a payback time of 3 years corresponds to a very high IRR was surprising for most managers. A manager of a very big company assured that there was no discussed project with an IRR below 20%, while he said just before that 3 out of the 4 projects had a payback time below 3 years.

When required payback times were converted in IRR hurdle rates and opposed to much lower WACC, no single manager made a link with a potential suboptimal level of investments on the long run. A popular justification among managers for high hurdle rate is that it is logic to require a high profitability from optional (additional) investments to compensate investments with low profitability that are necessary anyway. This contrasts with the notion that any marginal project with an unbiased expected profitability higher than the risk-weighted cost of capital increases the profitability of the firm. Most managers focus on project ranking and do not question the link with the hurdle rate and the optimal level of investment.

According to behavioural economics, decision makers attribute lower weight to opportunity costs (foregone energy savings in the case of not investing) compared to out-of-pocket costs (equipment purchase in the case of investing) (Sorrell et al. 2004, Sorrell 2009). This could potentially explain an irrationally high hurdle rate. For example, Andersson and Newell (2004) find energy investments are 40% more responsive to initial costs than annual savings. We could not test this hypothesis for the hurdle rate, but we clearly observed it in the perception of the carbon market. The incentive for investment from opportunity carbon costs (when overallocated) was perceived much lower than from out-of-pocket carbon costs (when underallocated) (see below).

4. Effect of policy on energy efficiency

Effect carbon market

Among motivations to invest in energy/carbon efficiency, "Expected gains or cost savings from Emission Trading Scheme"; "Avoid uncertainty induced by future ETS (unknown prices, future cap, proportion of free allocations)" and "Mentality change induced by Emission Trading Scheme" had an intermediate important score of 1.1, 0.9 and 0.8 respectively (see annex 1). We find that the scores are very different for those companies that have gas as only source of heat (bricks and 2 'other' companies) and those companies that use various fuels (cement and lime), who do not only burn more carbon intensive fuels, but also have much higher process emissions.

Table 2. Importance of voluntary agreement and the carbon market for triggering investments in energy efficiency. Scores are the mean of the following ordinal values: Very important=3; important=2; moderately important=1; not important=0. They correspond

to the mean of all companies, realized projects and future projects. Projects yielding only electricity efficiency were not questioned about the incentive from the carbon market.

	Unit	All sectors	Only natural gas (9 Bricks and 2 'other' companies)	Various fuels (2 Cement, 2 lime and 1 'other' company)
Voluntary agreement	Score (N=55)	1,5	1,6	1,3
Expected gains or cost savings from Emission Trading Scheme	Score (N=48)	1,1	0,7	1,9
Avoid uncertainty induced by future ETS (unknown prices, future cap, proportion of free allocations)	Score (N=48)	0,9	0,7	1,4
Mentality change induced by Emission Trading Scheme	Score (N=48)	0,8	0,5	1,3
Carbon price in PB or IRR calculation.	% of companies and projects (N=44)	33%	3%	100%
Future under-allocation higher effect than actual over-allocation?	% of companies (N=10)	90%	100%	67%
Certain price (ceiling and floor) higher incentive than actual volatile price?	# of companies (N=14)	Higher 7 Lower 3 Don't know 4	Higher 4 Lower 2 Don't know 4	Higher 3 Lower 1

Gas as single energy source (bricks & 2 'other')

For the brick industry and other sectors where the only heat source was natural gas, the motivation from the carbon market had scores around 0.7. This means that the mean impact was between moderate and inexistent.

This was confirmed by the fact that the advantage of carbon credits from energy efficiency measures was never included in profitability calculations to trigger these investments. Two companies argued that the carbon price was too low to be taken into account. The financial advantage is indeed not very important, but at a price of 15 euro (mean price covering the period), the carbon market increases the incomes of projects by 10%. This is an example a barrier because people use rules of thumb, or approximations to reduce the cost of information gathering.

More interestingly, the main invoked reason for all gas-fuelled companies for not including the carbon price was that they had excess emission rights. This is an example of status quo bias described by behavioural economics. As put forward by classical economics, when a company is over-allocated, a carbon efficiency project increases carbon income whereas when a company is under-allocated, the project reduces carbon costs. But the marginal effect on the profitability of an efficiency investment is the same. For one plant manager, this fact only became clear during the interview. In general, the ETS is seen as an environmental regulation with which they comply and thus where no attention is required. The following testimony is very representative for how these companies deal with an over-allocated cap and trade:

"When you save gas, you emit less CO₂, and those rights will remain unused and at a given moment they can be sold?"

"I suppose that is the case, but we didn't consider it at all, because the carbon story is done by somebody who is closer to the accounting department. It is disconnected from the one who is doing the production... I think that for us this is somewhat too abstract."

In line with this way of seeing the actual carbon market, from 11 companies using only gas, all expected that the future under-allocation in 2013 would have a higher effect on energy efficiency investments than the actual over-allocation. These companies plan to include the carbon gains in 2013, when they will be under-allocated.

In general, bricks that are more white or yellow contain high amounts of lime and thus have high process CO₂ emissions. For two producers that have clay quarries with a high concentration of calcium carbonate, these process emissions surpass 50% of their total emissions. For other producers, who produce mainly red bricks, process emissions are only 2% of emissions. None of the producers had taken action to lower process CO₂. One plant manager (part of a group) didn't have any idea of the amount of process emissions in his plant, nor could he say to what extent his emissions were above the benchmark of 139 kg CO₂/ton of bricks that will be applied from 2013. None of the producers had communicated towards customers on the high/low carbon content of yellow/red bricks. None of the producers considered promoting red bricks because of their lower carbon content. The voluntary agreement didn't take into account either this extremely cheap but culturally dependent abatement opportunity. For all producers, market demand is taken as given:

"We produce bricks for the market and we won't say, we don't make white stones. We try to capture all market opportunities, and certainly now. Will the carbon market have an effect on it? I don't think so. In the end, the customer is king." "It might trigger a communication strategy?" "Yes, but it depends on the architects, to what extent do they take that up? They prescribe."

Only 1 producer, with a good energy efficiency but with high levels of process CO₂ was considering a new kiln to be able to make whiter stones with other materials (kaolin). The trigger was the discovery that their carbon content was far above the EU benchmark for the bricks from 2013 (139 kg CO₂ per ton of bricks), even if they will continue to be allocated above this benchmark after 2013.

Plants with various fuels (Cement, lime, 1 'other')

The 5 companies that use various fuels (cement, lime and 1 'other' company) are all part of a MNO organisation. Motivations induced by emission trading scored between 1.9 and 1.3, which is twice as important as for gas-fuelled companies (see table 1).

Besides higher energy carbon intensity they have process emissions that largely exceed energy emissions. They all include carbon market advantages in their payback times in line with the fact that the effect on project profitability is the same. Some think the future underallocation will have a bigger effect because there is a more important focus on production cost minimization compared to carbon income maximization. Others think that the future underallocation and the associated risk of offshoring will hamper the biggest investments (new plants for example).

Effect voluntary agreement

The importance of voluntary agreements for triggering past and future projects obtained a score of 1.55, which is the fourth important motivation, more important than the motivation "expected gains or cost savings from ETS" (rank 6, score 1.1). The higher importance is even more pronounced for realize projects because a number of investments were part of projects that were designated by the audits of the voluntary agreement. However, for potential future projects, the ETS (score 1.3) was perceived as more important compared to the voluntary agreement (score 0.9).

The additionality of the voluntary agreement is difficult to assess however, since only profitable projects were imposed. The perception of the interviewed persons is that the program was effective in dealing with informational barriers, by imposing and subsidizing energy audits. It also was perceived as effective in imposing investments that may have been impeded by strict capital budgeting. The impact was more important for the smaller brick companies compared to the larger cement and lime factories. Indeed, the audits imposed by the regulation led to new insights for certain companies, especially smaller plants even if they are integrated in an international group:

Again, the trigger was the voluntary agreement. What are the profitable measures? We got a consultant, we let them have a look and they have given us the initial drive. Damned we have been sleeping. So we have started to plot everything. If you aren't informed you won't be able to do anything."

Others think the imposed measures would be realized without the agreement, but less systematically and later.

"Was the voluntary agreement a primary trigger for the new motors ?" "Yes, but not with the same systematism. Somehow the voluntary agreement is not very motivating in se. It is relatively cumbersome... It hasn't induced fundamental changes. It has somehow listed things that are realized naturally." "Did you do the energy audits already?" "(Because of the agreement) we did them in a single time, but energy matters were already analysed in the past. We are in an energy-intensive industry... We question energy since 15-20 years.

And a third category of managers indicate that the projects would also have been realised without voluntary agreement :

"I first look at the operation of the plant, the optimisation of everything and then, when we have to issue a report for the voluntary agreement, we look at what the investments fit in it." "Without the voluntary agreement, would the investments be the same?" "Yes".

The financial incentive created by the voluntary agreement is small, compared to the EU ETS. On the one hand, the gains are only moderately important: subsidized energy audits and reduced required green certificates for electricity consumption. On the other hand, the cost for participating companies is low because the only projects that are imposed are profitable projects and costs are essentially in the form of higher communication of data. Hence, a major motivation to participate in the program is the need for big corporations to be on good terms with the local government.

"Did you calculate the advantage of participating in the agreement or was it only to have a good relationship with the regional government?" "Relationship is a big word. There was again a big pressure from the Region to make everybody participate. By the way, for the new voluntary agreement (2012-2020) almost everybody has signed. There is an element of social pressure. I don't think we include the advantage of green certificates

in our payback times. But since it was about investments with a payback time of three years or less, this element has played, it was the triggering element."

5. Conclusions

This study questioned 39 motivations and barriers to energy efficiency in energy intensive companies. We observe a large gap between formal hurdle rates for energy efficiency projects (and any other non-compulsory investment) and weighted average cost of capital (WACC). Our study suggests that a certain number of hidden costs and risks, such as the cost of studying investment opportunities, the risk of technical setbacks, declined demand, unknown future changes in production setup, should be taken into account to obtain an unbiased risk-adjusted IRR that would allow a comparison with a WACC. But in general, hidden costs, risk and uncertainty are perceived as of secondary importance because most of the innovations allow for a gain in product quality and a higher level of automation. Hence they don't seem to justify dividing by three or four the hurdle rate of 30% applied to the majority of projects to come close to the WACC. This indicates that organizational barriers lead to more than cost-effective hurdle rates.

The most important perceived barriers are related to capital availability (barriers ranked first and third). Companies postpone cost-effective measures because they compete with other investments. Not because energy related investments are seen as less important (energy counts for 30% of production costs), but because energy related investments are generally optional and are squeezed out by investments that have a more compulsory character. Strict capital budgeting, which for the big majority of companies is a choice not a matter of access to capital markets, is described in the literature as a way of reducing agency costs between managers and shareholders, but is costly to the extent that it impedes genuine profit-increasing investments.

The problem of a higher than cost-efficient hurdle rate may be exacerbated by the fact that project selection typically is based on payback times, where the contradiction between the implied IRR and the WACC is not apparent

Barriers related to information and knowledge are the second most important explanation for postponed investments. On the one hand, specific energy use is difficult to measure because it depends on many factors such as production speed. On the other hand, the fact that technical and financial feasibility is studied, explains largely that certain investments are triggered, indicating that lack of time or routines impeded them from being realized earlier.

Split incentives from asymmetric information on energy efficiency of plant-specific equipment, built by external suppliers, is of intermediate importance in the sense that energy efficiency in equipment supplier contracts is rarely legally enforceable because very dependent on production conditions. But on the other hand, detailed discussions on technical specifications with engineers of the firm (principal) allow a reasonable visibility of the energy efficiency.

Concerning the effect of the EU ETS on investments with energy/carbon efficiency we observe the following:

- For companies with gas as only in heat source (bricks sector), the gain in carbon allowances induced by energy efficiency investments is never included in payback times or IRR. In this sector, the EU ETS didn't create changes in the way of dealing with process emissions either.

- The cement and lime sector do integrate carbon gains in their payback or IRR calculations. The ETS is perceived as a relatively important motivation for past and future investments in these sectors.

- The new allocation rules from 2013 are likely to change the impact on energy efficiency because even if the carbon incentive of an allocation above or below emissions is the same according to orthodox economic theory, an allocation below emissions, where the ETS entails a real cash flow, is perceived as a much stronger incentive compared to the situation of allocation above emissions.

The 2 major barriers, internal capital budgeting and barriers related to information and knowledge are an important rationale for the voluntary agreement and indicate that genuine cost-effective investments can be obtained. The voluntary agreement was perceived by the majority of managers as a motivation that accelerated past investments, certainly in the case of companies with lower information levels on energy efficiency and for companies with high very strict capital budgeting. However other managers questioned the additionality of the policy.

6. References

- Abdelaziz E.A., Saidur R., Mekhilef S. (2011) A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 150-168.
- Agrafiotis C., Tsoutsos T. (2001) Energy saving technologies in the European Ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering* 21, 1231-1249.
- Akerlof G. (1970) The market for lemons. *Quarterly Journal of Economics* 84(3), 488-500.
- Anderson S.T. Newell R.G. (2004) Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits. *Resource and energy economics* 26, 27-50.
- Ansar J., Sparks R. (2009) The experience curve, option value, and the energy paradox. *Energy Policy* 37, 1012-1020.
- Barros M.C., Bello P., Roca E., Casares J.J. (2007) Integrated pollution prevention and control for heavy ceramic industry in Galicia (NW Spain) *Journal of Hazardous Materials* 141, 680-692.
- BREF (2007) Reference document on Best Available Techniques in the ceramic manufacturing industry. European Commission.
- BREF (2010) Reference document on Best Available Techniques in the cement, lime and magnesium oxide industries. European Commission.
- de Groot H.L.F., Verhoef E.T., Nijkamp P. (2001) Energy savings by firms: decision-making, barriers and policies. *Energy Economics* 23, 717-740.
- DeCanio S.J. (1993) Barriers within firms to energy efficient investments. *Energy Policy* 906-914.
- DeCanio S.J. (1998) The efficiency paradox: bureaucratic and organizational barriers to profitable energy-saving investments. *Energy Policy* 26 (5), 441-454.
- Fleiter T., Worrell E., Eichhammer W. (2011) Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models - A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3099-3111.
- Hassett K., Metcalf G.E. (1993) Energy conservation investment. Do consumers discount the future correctly? *Energy Policy* 21(6)
- Hirst E., Brown, M. (1990) Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. *Resources, Conservation and Recycling* 3, 267-281.
- Hoffmann F.H. (2007) EU ETS and Investment Decisions: the case of the German Electricity Industry. *European Management Journal*, 25(6), 464-474.
- Hoffmann V.H., Trautmann T. (2008) Three types of impact from the European emission trading scheme: direct cost, indirect cost and uncertainty. In: Hansjürgens B., Antes R. 2008 *Economics and Management of Climate Change*. Springer, New York, 111-123.
- IEA (2012) *World energy outlook*. International Energy Agency, Paris.
- Jaffe A.B., Newell R.G., Stavins R.N. 2004. *Economics of Energy Efficiency*. In: Cleveland (Eds.) *Encyclopedia of Energy*, Volume 2, pp. 79-90.
- Kahneman D., Tversky A. (Eds.). (2000). *Choices, values and frames*. New York: Cambridge University Press.

- Madloul N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A. (2011) A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2042-2060.
- Mehra R. (2003) The equity premium: why is it a puzzle? *The Financial Analyst Journal* 59, 54-69.
- Meyers, S.C. Majluf N.S. (1984) Corporate financing and investment decisions when firms have information that investors do not have. *Journal of Financial Economics*, 13, 187-221.
- Moya J.A., Pardo N., Mercier A. (2011) The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgetting decision criteria. *Journal of Cleaner Production* 19, 1207-1215.
- Palm J., Thollander P. (2010) An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. *Applied Energy* 87, 3255-3261.
- Pardo N., Moya J. A., Mercier A. (2011) Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry. *Energy* 36, 3244-3254.
- Sanstad A.H., Blumstein C., Stoft S.E. (1995) How high are option values in energy-efficiency investments? *Energy Policy* 9, 739-743.
- Sardianou E. (2008) Barriers to industrial energy efficiency investments in Greece. *Journal of Cleaner Production* 16, 1416-1423.
- Schleich J. (2009) Barriers to energy efficiency: A comparison across the German commercial and services sector. *Ecological Economics* 68, 2150-2159
- Schleich J., Gruber E. (2006) Beyond case studies: Barriers to energy efficiency in commerce and the service sector. *Energy Economics* 30, 449-464.
- Sola A.V.H., Xavier A.A.P. (2007) Organizational human factors as barriers to energy efficiency in electrical motors systems in industry. *Energy Policy* 35, 5784-5794.
- Sorrell S., O'Malley, Schleich J., Scott S. (2004) *The economics of Energy Efficiency*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 349 pp.
- Stavins R., Jaffe J., Schatzki T. 2007 Too good to be true? An examination of the economic assessments of California climate change policy. NBER working paper 13587.
- Summers J.M and Poterba L. M. 1995 A CEO Survey of U.S. Companies' Time Horizons and Hurdle Rates. *Sloan management Review* 15 oct. 1995.
- Sutherland R.J. (1996) The economics of energy conservation policy. *Energy Policy* 24, 361-370.
- Van Soest D., Bulte E. (2001) Does the energy-efficiency paradox exist? Technological progress and uncertainty. *Environmental and Resource Economics* 18, 101-112.
- Verbruggen A., Fishedick M., Moomaw W., Weir T., Nadaï A., Nilsson L.J., Nyboer J., Sathaye J. (2010) Renewable energy costs, potentials, barriers: conceptual issues. *Energy Policy* 38, 850-861.
- Wambach A. (2000) Payback criterion, hurdle rates and the gain of waiting. *International Review of Financial Analysis* 9, 247-258.
- Weber L. (1997) Some reflections on barriers to the efficient use of energy. *Energy Policy* 25, 833-835.

- Williamson O.E. (2002) The Theory of the Firm as Governance Structure: From Choice to Contract. *Journal of Economic Perspectives* 16 (3), 171–195.
- Zakharov A.I., Begak M.V., Guseva T.V., Vartanyan M.A. (2009) Prospects for increasing the energy and ecological efficiency of the production of ceramic articles. *Glass and Ceramics* 66, 356-362.
- Zilahy G. (2004) Organisational factors determining the implementation of cleaner production measures in the corporate sector. *Journal of Cleaner Production* 12, 311-319.

7. Annex

Annex 1 Relative importance of motivations that triggered (or will trigger) energy efficiency measures at a given moment (and not 2 years later). Scores are the mean of the following ordinal values: very important=3; important=2; moderately important=1; not important=0.

	Rank	Total N=61	Company level N=11	Discussed realized projects N=39	Discussed potential future measures N=19
Classical economic reasons					
Increasing energy prices	1	2,5	2,6	2,3	2,6
Replace obsolete equipment/ production expansion	9	0,8	1,5	0,7	0,3
Applied technology has become cheaper	12	0,5	1,4	0,3	0,3
Result of in-house R&D	5	1,3	1,7	1,2	1,1
Policy					
Expected gains or cost savings from Emission Trading Scheme	6	1,1	1,8	0,7	1,3
Avoid risk induced by future ETS (unknown prices, cap, proportion of free allocations)	7	0,9	1,4	0,5	1,1
Mentality change induced by Emission Trading Scheme	8	0,8	1,2	0,5	0,8
Voluntary agreements	4	1,5	2,0	1,6	0,9
Comply with legal obligations (e.g. environmental licence)	13	0,5	1,4	0,1	0,5
Management					
Environmental image building towards clients	3	1,5	1,7	1,4	1,7
External pressures (from NGO, media, local community...)	11	0,5	1,0	0,4	0,5
Commitment by top management to an environmental policy	2	1,6	1,5	1,5	1,7
Implementation of environmental management system (targets, procedures, evaluation...)	9	0,8	1,1	0,8	0,5

Annex 2. Relative importance of barriers that explain why the energy efficiency measures were not implemented earlier or are not yet implemented. Scores are the mean of the following ordinal values: very important=3; important=2; moderately important=1; not important=0.

	Rank	Total N=61	Company level N=11	Discussed realized projects N=39	Discussed potential future measures N=19
Information					
Technical feasibility wasn't studied before	3	1,2	2,0	1,0	1,0
Profitability wasn't studied before	5	0,9	1,8	0,5	0,8
Lack of reliable information about the measure	6	0,8	1,6	0,6	0,7
Capital availability					
Other (non-energy-related) investments receive(d) prior financing	1	1,5	2,1	1,0	1,8
During former investments, strict capital budgeting squeezed out the energy-efficient option.	8	0,8	1,1	0,6	0,8
Difficulties to find (internal or external) financing for investments	4	1,2	1,7	0,9	1,5
Risk and uncertainty					
Risk of production disruptions, hassle, inconvenience	9	0,7	0,7	0,6	0,7
We have waited (wait) to see if the application of the technology by other companies/plants turned (turns) out to be reliable and profitable	11	0,6	1,4	0,4	0,5
Low demand risk: efficiency investments entail fixed costs that may be cost-inefficient when there is overcapacity during economic downturns.	2	1,2	1,7	0,6	1,9
Incentives					
Individuals/departments were (are) not accountable for energy/ emissions (or could (can) not benefit from energy/emission savings).	15	0,2	0,7	0,1	0,1
Conflicts of interests within the company	14	0,3	0,1	0,4	0,2
Organisation					
Need for training of employees or engagement of specifically skilled employees (ex. energy auditor)	12	0,6	0,8	0,3	0,8
Insufficient integration of energy/emissions into operating, maintenance or purchasing procedures	13	0,4	0,9	0,4	0,1
Lack of time of management	7	0,8	1,5	0,5	0,8
Energy manager lacks influence	16	0,1	0,3	0,1	0,1
Technology lock-in					
Technique was/is incompatible with other elements of the plant	10	0,6	1,0	0,4	0,8

Gestion durable des ressources minérales wallonnes : pistes de réflexion en vue d'une meilleure intégration de la problématique

Johan YANS

Département de Géologie, NaGRIDD, AcanthuM, Université de Namur, rue de Bruxelles 61, 5000 Namur
johan.yans@fundp.ac.be

1. Introduction

1.1. Hier et aujourd'hui...

De tous temps, l'Homme a exploité les ressources du sous-sol. Ages de la pierre (paléo- méso-néolithique), du cuivre (chalcolithique), du bronze, du fer, constituent autant de périodes définies par des minerais, des techniques et des produits. Les romains, ensuite, démontrèrent une connaissance et des applications approfondies des ressources métalliques de leur Empire. L'exploitation du sous-sol durant ces périodes était déjà associée (« causes - conséquences ») à des contextes environnementaux, sociaux, politiques et économiques complexes, encore très peu étudiés. Durant la première partie du XXème siècle, l'activité minière a répondu à une large diversification des demandes en matières premières minérales. On a alors exploité des puits, mines et carrières de taille plutôt modeste, sans trop prêter attention aux impacts environnementaux et sociaux.

Au début du XXIème siècle, la valeur des géoressources augmente considérablement. Le cours du cuivre, par exemple, passe d'environ 1.500 EUR/tonne en 2000 à plus de 7.300 EUR/tonne début 2011, pour se maintenir à plus de 6.100 EUR/tonne fin novembre 2012. Quantitativement, on extrait du sous-sol 27 fois plus de minéraux qu'il y a un siècle. A l'échelle mondiale, le secteur est contrôlé par des *majors* qui exploitent des mines et carrières d'assez grande taille. En parallèle, l'activité dite « artisanale » (et souvent illégale) demeure une part substantielle de l'activité dans plusieurs pays et/ou régions, en voie de développement surtout. Par exemple, le secteur minier artisanal compterait un million de creuseurs dans la seule (mais vaste) République démocratique du Congo (Mukanirwa Tshimpambu, 2006).

1.2. Enjeux et contextes

La grande majorité des objets utilisés de nos jours proviennent (in)directement de matériaux issus des entrailles de la Terre. De nombreuses ressources minérales sont requises pour la fabrication de produits finis, particulièrement dans les domaines du High-Tech, du développement et de la construction durables. Des minerais de tantale sont ainsi nécessaires pour fabriquer les GSM, du lithium est utilisé pour les batteries des voitures électriques, des minerais de terres rares comme le samarium sont exigés pour les écrans plats, du néodyme pour les moteurs électriques et les aimants des éoliennes, du terbium pour les iPad, iPod et iPhone, du gadolinium pour le dépistage des cancers, sans parler des matières carbonées (pétrole, gaz, charbon), ou encore de l'uranium et du plutonium pour l'énergie, etc. La liste, très longue, des « besoins » (?) reprend quasiment tous les éléments du tableau chimique de Mendelév. Ces

constats géologiques établis, quelles sont les causes et conséquences politiques, économiques, environnementales et sociales de telles exploitations ? Peu d'études systémiques, intégrant toutes ces approches, sont actuellement disponibles. L'approche holistique demeure pourtant essentielle pour une compréhension exhaustive de la problématique et donc, pour une prise de décision raisonnée, raisonnable et responsable.

Récemment, des voix occidentales se sont manifestées, attirant l'attention du Grand Public sur les conditions catastrophiques des exploitations minières, par exemple en République démocratique du Congo (film *Katanga Business*, Th. Michel¹) ou ailleurs (*Les minerais de sang*, Ch. Boltanski²). De nombreuses matières géologiques utiles sont extraites dans des pays éloignés de la Wallonie et dans des régimes politiques différents de celui pratiqué chez nous ; il peut en résulter une certaine indifférence du citoyen wallon quant aux implications de telles exploitations lointaines. De plus, et c'est assez méconnu de l'opinion publique et des décideurs politiques wallons, plusieurs matières premières sont directement extraites du sous-sol wallon : citons, sans souci d'exhaustivité, des argiles pour les briques et les tuiles, de la craie pour le ciment, du porphyre pour le ballast ferroviaire, du calcaire pour la chaux, de la dolomie, du sable, du silex, des pierres ornementales (pierre bleue belge par exemple), ... Ces matières entrent dans la fabrication d'une part substantielle de l'économie wallonne et forment la base d'un potentiel technologique innovant, rentable et générateur d'emplois diversement qualifiés. En 2011, on estimait la production wallonne à environ 63 millions de tonnes, contre 56,4 millions de tonnes en 2010 (+ 11,6% en un an), 3.000 emplois directs auxquels il faut ajouter les emplois indirects³, pour un turnover d'environ 560 millions € (FEDIEX⁴, 2011). Des gisements d'argiles imperméables sont en outre nécessaires pour assurer la réhabilitation des sites pollués et sceller les centres d'enfouissement technique (CET) ; ils peuvent aussi constituer d'excellentes barrières naturelles pour stocker, à (court) terme, les (in)évitables déchets radioactifs, issus des centrales nucléaires belges.

En Wallonie, et à divers degrés partout ailleurs, les carrières et les mines sont perçues par l'opinion publique comme des lieux qui « *polluent* », « *sentent mauvais* », « *détruisent le paysage* », « *augmentent le charroi* », « *alimentent le grand capital* », « *tuent la flore et la faune* », exploitant des ressources naturelles par essence non renouvelables. Les reconversions difficiles, tant au niveau social qu'environnemental, dans les charbonnages et la sidérurgie, tous deux associés aux ressources minérales locales, demeurent dans les esprits et contribuent à une image négative du secteur minier dans l'opinion publique wallonne (« gueules noires », drames sociaux, conquêtes ouvrières parfois sanglantes de type germinal, ...). Parmi les causes de ces échecs figure un relatif manque de (pré)vision dans les reconversions associées aux matières premières du sous-sol wallon, notamment sans doute par manque de courage politique et absence d'une approche intégrée de la problématique.

Par définition limitées, les ressources géologiques sont en apparence contradiction avec le concept de développement durable. Durant l'actuelle période de transition vers une voie plus durable, quel(s) rôle(s) allons-nous donner/tolérer aux matières premières géologiques, omniprésentes dans les processus de fabrication de nombreux produits, y compris ceux essentiels aux énergies renouvelables elles-mêmes (éoliennes, panneaux photovoltaïques, ampoules économiques, etc) ? La question se pose pour les matières géologiques « lointaines » mais également pour les matières premières géologiques wallonnes. Comment concilier la

1 Michel T. (2009). *Katanga Business*. Long métrage documentaire. www.katanga-lefilm.com.

2 Boltanski Ch. (2012). *Les minerais de sang*. Ed. Grasset, 352 p.

3 16.000 postes pour le transport, la manutention, l'entretien et la réparation des équipements de carrière (Poskin, 2010).

4 FEDIEX. Fédération des industries extractives de Belgique.

réticence de l'opinion publique envers les carrières wallonnes avec les besoins de matières premières minérales ? Une intégration de la problématique, à plusieurs niveaux (géologie, économie, environnement, politique, social) semble nécessaire. Nous tentons d'apporter, ci-dessous, quelques pistes de réflexions, à l'heure où des débats similaires s'animent un peu partout en Europe.

2. Quelques pistes de solution ?

Dans un contexte de demande en hausse (nouvelles techniques *durables* et nouveaux marchés, besoin en logements et en matériaux de construction, développement de produits high-tech), d'une conscientisation élargie du développement durable chez le citoyen et les décideurs politiques, et de coûts accrus du transport (émissions de CO₂, usure des infrastructures, énergie, ...), l'exploitation future des ressources minérales wallonnes est clairement transdisciplinaire : les approches géologiques, économiques, sociales, politiques et environnementales sont à croiser.

2.1. Reconsidérer les enjeux environnementaux à l'échelle globale

Les matières premières du sous-sol sont généralement classées en quatre pôles : ressources énergétiques (pétrole, gaz, charbon, lignite, voire uranium, ...), métaux (plomb, zinc, cuivre, tantale, niobium, tungstène, chrome,...), pierres (semi-)précieuses (saphir, rubis, diamant, ...) et les autres ressources non-métalliques fréquemment appelées « *raw materials* » (argiles, grès, calcaires, dolomies, sables, ...). Seul ce dernier type de matière est aujourd'hui extrait du sous-sol wallon.

Considérer la gestion des matières premières géologiques dans un contexte de développement durable, en Wallonie comme ailleurs, implique une intégration dans une vision globale, sous peine de soustraire un des paramètres du débat. A l'échelle mondiale, les matières premières géologiques revêtent une réputation *sulfureuse*. L'exploitation des minerais est guidée par des besoins (?) économiques, sous couvert de géopolitique, entraînant des concurrences exacerbées ou, à l'inverse, des positions de monopole, un « protectionnisme géologique », des tensions internationales et des conflits juridiques (voir ci-après). L'accès aux mines, carrières et puits, génère en outre des tensions sociales à divers degrés, selon les régions du monde : conflits armés, lutte de « classes », pollutions, consultation urbanistique, protectionnisme, ... Or noir, coltan⁵, uranium, et la liste est bien longue, sont autant de matières qui, dans l'opinion publique mondiale, sont synonymes d'argent sale, de violence, de pollutions, de corruption, ... Ainsi, pour ne citer qu'un seul exemple actuellement très médiatisé, le commerce artisanal et illégal du coltan et de l'or dans l'Est de la RDC est un problème complexe qui met en jeu de nombreux aspects ⁶.

Les mines et carrières restent meurtrières ? Il est vrai qu'elles tuent chaque année en Chine, RDC, Indonésie, etc et il faut oeuvrer sans cesse pour la mise en place de normes de sécurité efficaces, à l'échelle internationale. Il est vrai, aussi, que l'accès aux ressources minérales, dans ces pays, s'accompagne souvent de procédés mafieux qu'il faut dénoncer et

5 Il s'agit d'un « mélange » entre deux minéraux : columbite – (Fe,Mn)Nb₂O₆ et tantalite – (Fe,Mn)Ta₂O₆, qui constitue un composé essentiel dans la fabrication des GSM, notamment.

6 Sans entrer dans le détail, il est à souligner que le commerce artisanal et illégal des ressources minérales représente tout d'abord une source de revenus indispensables pour la population locale, dans des régions (par exemple au Kivu) qui ne sont que très imparfaitement contrôlées par l'Etat (De Putter, 2012). Il serait en outre exagéré d'établir un lien de causalité exclusif entre commerce illégal des minerais et conflit (Jacquemot, 2009). Nier ce lien serait également abusif. La nuance est requise, dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres lorsqu'on débat de la nécessité de l'exploitation des ressources géologiques...

enrailler, autant que faire se peut. Mais ce constat de « minerais de sang » n'est pas d'application pour les carrières wallonnes. Les accidents de travail y sont très rares ; à ma connaissance, on ne dénombre aucun meurtre pour l'accès aux ressources minérales wallonnes... Des normes de sécurité de plus en plus drastiques sont respectées et montrent leur efficacité ; la conscientisation du personnel aux normes de sécurité est une priorité des sociétés extractives.

Les mines et carrières restent polluantes ? Il est vrai que l'exploitation de certains minerais, dans le monde, est entachée de pollutions inacceptables, hélas souvent *classées sans suite*. La législation wallonne en la matière est au contraire rigoureuse, certains diront « contraignante » et c'est tant mieux ! En Wallonie, les gisements potentiels font l'objet d'études d'incidences documentées avant toute exploitation. Même les demandes d'extension de carrière doivent démontrer, et c'est bien légitime, des implications environnementales limitées. Des plans de réaffectation de chaque site exploité sont requis. Il est en outre logiquement demandé de fournir des garanties financières pour certifier les aménagements après l'exploitation. Ces procédures peuvent être très longues (plus d'une décennie), ce qui est parfois inadéquat pour les prévisions stratégiques des sociétés extractives...

Tant au niveau sécuritaire qu'au niveau environnemental, les exploitations wallonnes ne doivent souffrir d'aucune comparaison avec les situations parfois catastrophiques de l'activité extractive dans certaines régions du Monde. A qualité égale, une matière première extraite en Wallonie impacte beaucoup moins l'environnement et les populations, globalement, qu'une matière extraite en République démocratique du Congo ou en Roumanie, par exemple.

2.2. Reconsidérer les enjeux économiques, dans une perspective d'évolution des minerais et des marchés

Récemment, la pénurie avérée de certaines matières, la prise de conscience du développement durable, l'augmentation du coût réel et environnemental des ressources minérales (extraction, transport, traitement) ont (re)mis en cause les (in)certitudes géologiques et les enjeux économique-politiques qui y sont associés, à toutes les échelles spatiales (commune, région, pays, continent, planète).

La notion de minerai est, par essence, évolutive. Les minerais d'hier ne sont pas ceux d'aujourd'hui, ni ceux de demain. On prospecte et exploite aujourd'hui des roches pour en extraire des substances qui étaient autrefois sans intérêt économique connu (ex. indium, rhodium, germanium). Le cas échéant, on ré-exploite des stériles (anciens terrils, anciennes haldes) pour y (re)trouver des substances considérées jadis comme inutiles.

Actuellement, le sous-sol wallon est exploité presque exclusivement à ciel ouvert. Depuis la seconde guerre mondiale et pour diverses raisons, le nombre de carrières a connu une diminution significative, accompagnée d'un accroissement de la surface moyenne des sites actifs (Goemaere, 2002 *in* Remacle, 2005). L'exploitation des carrières souterraines a subi un déclin encore plus spectaculaire que celle des sites d'extraction à ciel ouvert : plus de 400 en 1913, 122 en 1950 (Gulinck, 1958) et une seule actuellement, la carrière de marbre noir de Golzinne (Remacle, 2005).

A ce jour, de nombreuses données éparses, incomplètes spatialement, ou anciennes existent en ce qui concerne l'activité extractive en Wallonie ; elles se retrouvent éparpillées au sein de différentes administrations, universités ou autres organismes publics ou privés (Van de Castele et al., 2008). Trois inventaires des carrières wallonnes sont disponibles : le premier, connu sous le nom d'*étude Poty*, date de 1995-2001 (Poty & Chevalier, 2004). Le second, réalisé par le bureau d'étude *Incitec sprl*, date de 2006 et fait partie intégrante du rapport analytique

sur l'état de l'environnement wallon (Delbeuck et *al.*, 2007). Enfin, une base de données de la DAR-DGO4⁷ répertorie les demandes en cours de révision de plan de secteur pour les zones d'extraction. De tels états des lieux, statiques, sont certes nécessaires pour cerner les carrières actives, les permis en cours de traitement, ceux octroyés et les extensions potentielles de gisements pour les minerais actuels. Mais, dans un domaine aussi évolutif que les ressources minérales, c'est surtout une prospective qui est requise, en plusieurs étapes, dans un contexte global de gestion durable des ressources par définition limitées et fluctuantes. La nécessité d'y inclure nos connaissances géologiques est évidente : localisation approximative et qualité générale des substances utiles (minéralogie, type de gangue, etc) demeurent des questions centrales. En la matière, les techniques de prospection et de caractérisation des minerais s'améliorent très rapidement et les estimations, tant qualitatives que quantitatives, s'affinent très régulièrement !

L'objectif, certes ambitieux, est triple : évaluer les ressources, estimer l'offre et prévoir la demande, et ce en parallèle. Il semble nécessaire, sous peine de (re)vivre certaines déconvenues sociales et environnementales, de développer un plan stratégique des ressources du sous-sol wallon radicalement basé sur les minerais de l'avenir. L'exploitation de matières autrefois extraites en Wallonie, et dont l'arrêt est lié à des contraintes strictement économiques (concurrence) et non géologiques (disponibilité), pourrait être envisagée à nouveau. A ce propos, il est temps de ré-envisager le potentiel réel du sous-sol wallon en *raw materials* (argiles, calcaires, dolomies, porphyres, ...), mais également en métaux, comme réserves stratégiques... Cet inventaire dynamique, qui fait aujourd'hui défaut, constitue une étape indispensable pour développer une stratégie crédible. Il est en effet judicieux et sain de connaître notre potentiel géologique, en intégrant d'autres disciplines que la seule géologie. En France, le ministre du Redressement productif A. Montebourg a récemment souhaité que la France puisse « redevenir un pays minier », en revisitant l'inventaire du sous-sol français ⁸.

Dans cette optique, plusieurs écueils pointent déjà. Nous en relevons au moins trois.

A) *Estimer les minerais et les marchés de demain ?*

Comment prévoir les ressources minérales utiles de demain ? Comment estimer, en parallèle, l'évolution de marchés intimement liés aux minerais ? Des prévisions, à l'échelle européenne et globale, sont disponibles. Bien qu'encore incomplètes et parfois soumises à la critique nourrie d'un point de vue méthodologique, ces synthèses fournissent une base de réflexion. Des études voient également le jour en Wallonie, notamment en ce qui concerne le secteur de la construction, où une demande accrue en nouveaux logements (construction ou rénovation) semble une tendance admise pour les prochaines décennies. A l'heure de l'ouverture des marchés et de la libre concurrence, le secteur carrier, au sens large, n'est plus circonscrit à des marchés locaux, voire régionaux, mais se décline dans une dimension davantage ouverte. En Wallonie, on importait près de 6,3 millions de tonnes en 2011 (FEDIEX, 2011). Dans le même temps, près de 30% de la production de pierre ornementale wallonne est destinée à l'exportation dans des pays limitrophes. Mais qu'en sera-t-il demain ? Dans une perspective de développement résolument durable de diminution drastique du coût environnemental lié au transport, il est vraisemblable qu'à terme, on en revienne à davantage d'exploitations locales, y compris pour des matières actuellement extraites loin de la Wallonie (métaux ?). Des (dizaines de) millions de tonnes de matières aujourd'hui déplacées devraient

⁷ DAR-DGO4 : Direction de l'aménagement régional de la DGO4, Service Public Wallon.

⁸ http://www.lepoint.fr/economie/arnaud-montebourg-la-france-doit-redevenir-un-pays-minier-16-10-2012-1517519_28.php (consulté le 25 novembre 2012).

être extraites, lorsque les contraintes géologiques le permettent, proches du lieu de leur valorisation, de façon à réduire les coûts et impacts liés au transport. Comment concilier ce retour à des exploitations proches avec le syndrome NIMBY (*Not In My Back Yard*), dans un contexte de demande accrue, de surcroît ?

B) Degré d'investigation ?

Estimer les réserves de minerais, c'est évidemment toucher le point sensible de l'industrie extractive... Mais il ne s'agit pas, à ce niveau, d'atteindre un degré de précision de l'ordre de celui requis par l'industrie pour envisager l'exploitation d'un gisement⁹. Le service public n'en a ni le besoin, ni les capacités. Il s'agit, tout au plus, d'envisager une vue d'ensemble, à l'échelle de la région (*country/state-scale screening*), largement suffisante mais absolument nécessaire pour définir une stratégie publique crédible.

C) Ressources et marchés de demain ou d'après-demain ?

Les ressources wallonnes de demain seront sans doute déjà (en partie) dépassées lorsque s'ouvriront les carrières, après la longue mise en place du processus inhérent à l'activité extractive en Wallonie : prospections géologiques, études d'incidences, octroi de permis et recours éventuels, ouverture de carrière/mine. C'est donc bien les matières d'après-demain qu'il faut cibler, en conservant et même augmentant encore notre souci de gestion durable.

2.3. Revoir les besoins, gérer la demande et la durée de vie des produits

Without a deliberate and sharp reduction in resource consumption to supportable levels, or a significant reduction in world population, the likelihood is high that we will experience during the 21st century tremendous dislocations in our global economy (Beatty, 2010). On ne cesse(ra) de le répéter : un effort accru doit, encore et toujours, être appliqué pour réduire les besoins réels de nos sociétés et augmenter la durée de vie des produits. Facile à écrire, certes... Cette tendance s'accompagne logiquement d'une révision de la demande en matières premières, y compris celles extraites du sous-sol wallon. Elle s'accompagne également d'une meilleure connaissance technique des matières premières, de façon à rentabiliser au mieux chaque tonne extraite. En ce sens, le service public et l'industrie extractive sont amenés à poursuivre leurs efforts communs pour le financement de recherches appliquées dans le domaine.

2.4. Valoriser les stériles en améliorant les contacts entre exploitants et industriels

Pour atteindre les produits qu'ils convoitent, les carriers extraient des matières aujourd'hui considérées comme « stériles », faute d'une réelle utilisation industrielle connue et/ou d'un prix de vente actuel rentable et/ou d'une connaissance des caractéristiques techniques du stérile, voire encore d'une connaissance du marché potentiel de ces stériles. Ces derniers sont de deux types : dépôts de couverture qui scellent un gisement et matières stratifiées dans le minerai. La notion de stérile, elle-même, est évidemment en constante évolution : une matière « stérile » hier peut rapidement devenir un « minerai », en fonction du marché et des améliorations des processus de fabrication industriels. Dans l'industrie extractive wallonne, des matières actuellement considérées comme stériles pourraient être valorisées dans divers

⁹ A l'échelle publique, on se limitera à l'operational storage capacity, là où le secteur privé requiert du site deployment.

secteurs. Plusieurs qualités de ces stériles remplaceraient avantageusement des matières aujourd'hui importées en Wallonie, voire fournir des composants innovants dans des produits high-tech du développement durable. Un inventaire dynamique de ces stériles, incluant des approches transdisciplinaires, est requis. Il en va de la gestion durable des gisements wallons.

2.5. Favoriser le recyclage

Il s'agit de poursuivre les efforts, par des mesures concrètes, dans le secteur du recyclage des matières premières appelées « secondaires », depuis les produits devenus inutilisables soit par usure ou par leur vétusté du fait de rapides avancées technologiques, soit par leur production concomitante et obligatoire (matières dites « fatales ») avec des produits industriels marchands ou résultant de l'exploitation de mines et carrières, soit encore engendrées par notre mode de vie (emballages, papier, verres, etc), selon la règle dite des 7 R « *reduce, recycle, reuse, recover, reclaim, reject, repair* » (Valençon, 2008). L'Union Européenne encourage cette voie. «*Il convient de prendre des mesures pour trouver des substituts aux matières premières critiques et améliorer le recyclage des 17 kg annuels de déchets d'équipements électriques et électroniques que chaque citoyen de l'UE produit aujourd'hui*», déclare cette année Antonio Tajani, vice-président de la Commission chargé de l'industrie et de l'entrepreneuriat. En Europe, 100% du plomb, 80% du chrome, 70% de l'aluminium, 43% du cuivre consommés sont déjà issus du recyclage. En Wallonie, le secteur s'est organisé et poursuit son développement. Plusieurs centres (*Centre Terre et Pierre*¹⁰, par exemple) ne cessent d'innover dans le domaine. En Belgique, le groupe *Solvay* développe de telles innovations, notamment en ce qui concernent les terres rares¹¹. L'optimisme est de rigueur, même si le recyclage n'est pas « la » solution unique car ses implications, surtout au niveau environnemental local et au niveau social, demeurent controversées.

2.6. Poursuivre la sensibilisation des carrières à la biodiversité des carrières

De récentes études scientifiques tendent à prouver que les milieux pionniers créés dans les carrières lors de l'extraction sont propices à de nombreuses espèces, certaines ayant une valeur patrimoniale importante, y compris en Wallonie (Remacle, 2005 ; Born, 2011). Prise sous cet angle, la carrière sort de la perception *négative* qu'elle génère auprès de l'opinion publique et revêt un intérêt environnemental *positif*. On ne peut qu'encourager l'industrie extractive à œuvrer vers des plans d'aménagement et de réaménagement en tenant compte de cette composante. Dans cette optique, la FEDIEX et l'Administration wallonne se sont mis d'accord en 2011 sur les termes d'une « Charte sectorielle carrières et biodiversité », s'intégrant dans la logique du futur « Plan 100% Nature » de la Wallonie (FEDIEX, 2011).

2.7. Mieux tenir compte des implications environnementales dans la valorisation des sociétés extractives

La valorisation (boursière) des sociétés minières ne tient pas directement compte des implications environnementales (risques écologiques et économiques) inhérentes à leur activité extractive. En exploitant des ressources par définition non renouvelables, ces sociétés entaillent un capital commun qu'il conviendrait de prendre en considération dans leur valorisation. Une taxe appliquée dès la source, c'est-à-dire dès l'extraction de la matière, est envisagée dans certains pays. Fortement débattue (taxes environnementales déjà payées

10 <http://www.ctp.be> pour un aperçu complet des activités de ce centre.

11 Lire Solvay en Terres Rares. Athena, 285, p.6, novembre 2012.

par l'industrie extractive, interventionnisme public, conséquences d'une telle mesure sur les marchés et l'emploi, effets pervers, etc), cette taxe est notamment revendiquée par plusieurs ONG pour les matières énergétiques dans le cadre du réchauffement climatique. A mon sens, cependant, on ne gagne rien, en cette période de transition vers une voie plus durable, à coups de taxes, procès, conflits...

2.8. Circonscrire la volatilité des cours des matières premières

Vaste programme qui sort sans doute des compétences directes de la seule Wallonie. L'usage géostratégique des cours des matières premières est omniprésent. C'est notamment le cas pour les terres rares (exploitées notamment par le groupe belge Solvay), si utiles dans bien des domaines durables (aimants d'éoliennes, ampoules économiques, ...), et dont l'extraction est quasi-monopolisée à 95% par la Chine (et en grande partie par la seule carrière de Bayan-Obo en Mongolie intérieure). Ce constat a généré des quotas et taxes à l'exportation (officiellement au nom de soucis écologiques !), un embargo partiel sur la Japon fin 2010 et l'opacité dans la fixation des prix (Bondaz, 2012). L'extraction des terres rares a conduit à une plainte des USA, avec le soutien de l'UE et du Japon, auprès de l'OMC le 13 mars 2012 pour non-respect des règles de commerce international. Résurgence d'un nationalisme juridique, politique de stockage, centrale d'achats, politique d'aide aux pays en voie de développement possédant des ressources minérales, sont autant de pistes vers une gouvernance qui réduirait la volatilité des cours des matières premières... Sans envisager (encore ?) de telles procédures au niveau wallon, une attention permanente doit être déployée pour chaque matière première minérale (stratégique ou non), de façon à éviter tout *dumping* ou envolée des prix, nuisible y compris au niveau du développement durable. Depuis une bonne décennie, par exemple, le secteur carrier wallon (*Pierre Bleue Belge*) fait face à la concurrence de produits d'importation. Des pierres, en provenance d'Asie notamment, se sont implantées sur les marchés wallons et européens, à la faveur d'un coût de transport nul ou presque (les pierres voyagent en effet sous la forme de ballast dans des bateaux transportant des produits à plus haute valeur ajoutée). Une caractérisation détaillée des qualités de pierres en question, ainsi que des cahiers des charges précis dans les ouvrages publics demeurent une forme de réponse à cette concurrence « déloyale ».

2.9. Informer le citoyen

Dans le domaine de l'extraction des ressources géologiques, la principale piste de réflexion/solution reste une information complète de la problématique, notamment à l'attention de l'opinion publique. La toute grande majorité des citoyens ignore les contraintes, enjeux et conséquences de l'exploitation des ressources minérales, en Wallonie comme ailleurs dans le monde. La perception se limite très souvent aux implications écologiques de l'extraction, sans appréhender les paramètres économiques, sociaux, politiques et techniques. Il est du devoir des universités, ainsi que de l'administration concernée, d'instruire, en dressant un spectre complet des paramètres, de façon strictement factuelle. Cela implique un travail de vulgarisation rigoureux et, comme toujours, délicat. Pour répondre à cette démarche, la formation des étudiants doit s'adapter, au travers de cours davantage orientés vers le développement durable et le transdisciplinaire, dans les *cursus* de géologie, ingénieur-géologue, ingénieur des mines, géographie, agronomie (pédologie), etc. Le citoyen est demandeur, les succès d'affluence dans les carrières wallonnes lors des journées du patrimoine en témoignent. En outre, les canevas d'octroi des permis d'exploiter pourraient, à terme, inclure une vulgarisation approfondie et obligatoire des dossiers envers l'opinion publique...

2.10. Favoriser la recherche fondamentale et appliquée transdisciplinaire

A ce jour, en Wallonie, aucune étude détaillée ne s'est développée au travers d'une approche résolument intégrée de la problématique. A l'étranger, le constat est souvent identique, même si, très récemment, on voit apparaître des initiatives en ce sens. On citera les « Journées d'étude université de Genève ¹² », qui ambitionnent de (i) *s'ouvrir vers les enjeux environnementaux, économiques et sociétaux liés à l'exploitation sensu lato des matières premières, et (ii) inscrire les problématiques liées aux ressources minérales dans un cadre pluridisciplinaire*. C'est dans cette perspective, encore très embryonnaire certes, que s'est tenu en mars 2012 à Bruxelles, le colloque « *Which quarry for tomorrow ? Partnership between the raw mineral industries and the scientific research* ¹³ », plaidant pour une collaboration plus étroite entre exploitants, centres de recherche-universités et administrations concernées. Un premier pas, qui en appelle d'autres, vers une approche intégrée...

2.11. Créer un « centre public wallon » de référence dans le domaine

Pour atteindre les ambitieux objectifs repris ci-dessus, une expertise, capable d'intégrer tous les paramètres de la problématique, est requise dans le service public. Depuis les réformes de l'Etat de 1980 et 1993, la gestion du sous-sol de la Belgique est une compétence régionale. L'actuel Service Géologique de Belgique, récemment transféré à l'Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB), apparaît inadéquat pour servir de référence régionale. La Wallonie devrait se doter d'un Service Géologique Wallon (SGW), amené à jouer un rôle central dans le domaine de l'activité extractive (y compris dans les sous-domaines des risques naturels, de l'hydrogéologie, de la cartographie, des risques associés aux anciens puits de mines et anciennes carrières, etc) mais aussi dans la gestion économique, politique, environnementale et sociale de l'extraction. Il pourrait éventuellement s'intégrer dans une Direction Générale Opérationnelle (DGO) du développement durable au sein du SPW. Il devrait en outre, s'il veut demeurer en phase avec la formation des jeunes et les évolutions techniques du secteur, s'atteler à développer des collaborations scientifiques avec les centres de recherche et les universités. Mais, ce SGW pourra-t-il répondre, en direct (sans passer par une entité fédérale), aux recommandations et exigences européennes en la matière ? Seuls les pays semblent être les interlocuteurs directs auprès de l'Europe. Les récents projets EUROGEOSURVEYS¹⁴ et THERMOMAP¹⁵, par exemple, ont été confiés par l'Europe au Service géologique de Belgique. Un aménagement est donc souhaitable, dans l'intérêt général.

2.12. Informer le décideur politique... afin de définir une stratégie claire

Le décideur politique, à quelque « niveau » (communal, provincial, régional) et les administrations concernées, semblent également avides de compléments d'informations, en ce qui concernent tous les aspects de l'industrie extractive wallonne. Il est bien plus sain et *rentable* de prendre une décision raisonnée et argumentée, dans un domaine aussi opaque que celui des carrières, souvent ressenti par l'électeur comme irrationnel et discutable. Bien qu'introduits à l'administration wallonne il y a plus d'une dizaine d'années par les industriels,

12 <http://edytem.univ-savoie.fr/-Ecole-thematique-Ressources>.

13 http://www.geologicabelgica.be/gb.php?page_menu=Meetings&page_title=Forthcoming&lg=fr.

14 Association de 33 services géologiques nationaux, y compris le Service géologique de Belgique. Voir : <http://www.eurogeosurveys.org>.

15 Le projet ThermoMap (Area mapping of superficial geothermic resources by soil and groundwater data), financé par le 7ème programme cadre (FP7-ICT Policy Support Programme) de l'Union Européenne, vise à cartographier les zones à potentiel pour la géothermie faible profondeur en Europe. Ce programme inclut le Service géologique de Belgique. Voir : <http://www.thermomap-project.eu>.

des dossiers visant à demander l'autorisation d'extraire une ressource géologique dans une zone documentée, demeurent toujours sans réponse (positive ou négative). Comment les sociétés extractives peuvent-elles, dans ces conditions, établir des stratégies industrielles et commerciales crédibles, dans un marché par ailleurs de plus en plus exigeant ? Fournir des réponses dans des délais raisonnables, sur base d'une ligne politique claire en la matière, est donc essentiel. Ces réponses politiques doivent intégrer les aspects géologiques, environnementaux, sociaux et économiques.

En Europe, une stratégie se dessine. «*L'approvisionnement en matières premières, vital pour l'industrie de haute technologie d'aujourd'hui, devient de plus en plus problématique*¹⁶», précise la Commission européenne, qui a proposé, le 29 février 2012, la mise en place d'un partenariat d'innovation européen sur les matières premières, afin de soutenir la prospection, l'extraction et la transformation des matières premières. «*La valeur des ressources minérales inexploitées en Europe, à une profondeur de 500 à 1.000 mètres, serait, d'après les estimations, d'environ 100 milliards d'euros. Les nouvelles technologies permettront d'extraire davantage en profondeur, dans des zones plus éloignées et dans des conditions hostiles*», indique encore la Commission.

En se basant sur la notion de *minerais stratégiques*, l'assemblée nationale française a publié le 26 octobre 2011 un rapport d'information consacré à la gestion durable des matières premières minérales. Depuis, cependant, d'aucuns s'interrogent, chez nos voisins français, sur la stratégie à développer. *La France devra-t-elle rouvrir ses mines ?* Ce titre, à dessein provocateur, du journal *Le Monde*¹⁷, s'appuie sur le constat suivant : d'une part, la France renferme dans son sous-sol des ressources telles qu'uranium, or, plomb, fer, charbon, ... ; d'autre part, le gouvernement français a décidé, le 5 septembre 2012, de modifier le code minier pour le rendre plus protecteur de l'environnement. Le paradoxe (« environnement » *versus* « extraction minière ») n'est que partiel et il s'éclaircit lorsque tous les paramètres de la problématique sont étayés, de façon factuelle.

En Wallonie, qu'en est-il ? On l'a déjà mentionné, un plan stratégique est requis. *Un plan stratégique à l'échelle régionale pour l'exploitation des ressources du sol par le secteur carrier* a été demandé le 11 octobre 2011 en Séance publique de la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de la mobilité du Parlement Wallon. Gageons qu'il s'agit là d'une étape vers une stratégie publique, durable et intégrée des ressources minérales. Mais avant d'envisager quelque stratégie, on ne cessera de répéter qu'il faut tenir compte de toutes les données du problème, de façon à décider en connaissance de cause et assumer plus facilement ses choix !

Sans attendre, la Fédération des industries extractives de Belgique (FEDIEX) s'est dotée d'un business-plan 2012-2016¹⁸ qui définit clairement ses priorités pour les cinq années à venir. La FEDIEX est (assez logiquement) « convaincue que les trois régions et l'Etat fédéral devraient inclure la conservation de l'industrie primaire et secondaire dans leurs stratégies de développement ». Et la FEDIEX d'inviter à i) une fiscalité juste et équilibrée, ii) des conditions adéquates d'accès aux marchés, iii) une intégration des impositions légales et réglementaires dans le secteur carrier. Assez rapidement, une proposition de *plan stratégique à l'échelle régionale pour l'exploitation des ressources du sol par le secteur carrier* est nécessaire, afin de nourrir le dialogue entre le secteur public et le secteur privé qui affiche ses volontés de travailler, en matière de développement durable, à la recherche de solutions en partenariat avec ses interlocuteurs.

16 <http://www.actu-environnement.com/ae/news/industrie-mines-minerais-terres-rares-fossiles-15084.php4> (consulté le 25 novembre 2012).

17 Le Monde du 10 septembre 2012.

18 <http://www.fediex.be/uploads/File/RA-Fediex-fr-2011web.pdf> (consulté le 12 septembre 2012).

3. En guise de conclusion

Le secteur carriér wallon est dans une période « charnière ». Comment maintenir, voire augmenter, le savoir-faire reconnu, performant et sensibilisé au développement durable, de l'industrie extractive wallonne, durant l'actuelle période de transition vers une voie davantage durable ? Devrions-nous ralentir, voire abandonner certaines technologies, y compris des technologies durables nécessitant des matières premières du sous-sol, par manque de matériau disponible, alors que, de plus en plus, on parle de la nécessité de ré-industrialisation ? La carrière « locale » serait-elle, tout bien considéré, un chaînon insoupçonné de la transition vers une voie plus durable, à l'échelle globale ? Entre aspects sociaux, économiques, politiques, environnementaux et géologiques, le secteur carriér wallon poursuit son ouverture et sa transparence envers le citoyen et le décideur politique. Dans ce climat de dialogue, il appartient aux décideurs politiques de définir une stratégie crédible, claire et performante des ressources minérales du sous-sol wallon, après avoir analysé tous les paramètres de la problématique, y compris le réel potentiel du sous-sol wallon pour demain et après-demain. Une approche systémique est donc requise. Elle demeure entièrement compatible avec la poursuite de recherches fondamentales et appliquées dans les domaines spécialisés de la géologie, de la gîtologie et de l'industrie minière. L'instauration d'un organisme wallon de référence dans le domaine, par exemple un service géologique wallon, semblerait utile pour traiter de la complexité des matières premières du sous-sol, compétence régionale en Belgique. En parallèle, poursuivons nos efforts communs – industrie extractive, administrations, ministères, centres de recherche, universités – pour 1) reconsidérer les enjeux économiques dans une perspective dynamique, 2) valoriser les stériles actuels, 3) augmenter de façon raisonnée le recyclage, 4) poursuivre la sensibilisation à la biodiversité des carrières, et surtout 5) informer le citoyen, l'étudiant et le décideur politique en utilisant une approche pluridisciplinaire.

Témoignons, dans ce domaine, d'esprit constructif, loin des réactions défensives et attentistes de l'écologisme radical ou du capitalisme exacerbé. La solution, ou plutôt les solutions, sont bien entendu quelque part entre les extrêmes.

4. Références

- Beatty R. (2010). The declining discovery trend: people, science or scarcity? *Society of Economic Geology newsletter*, 81, 14-16.
- Bondaz A. (2012). Les terres rares en Chine : une politique de plus en plus contestée. http://www.centreasia.eu/sites/default/files/publications_pdf/note_les_terres_rares_en_chine_une_politique_de_plus_en_plus_contestee_0.pdf. Consulté le 24 novembre 2012.
- Born Ch.-H. (2011). Quel espace pour la nature en Wallonie ? L'intégration de la biodiversité dans les plans d'aménagement du territoire (II). *Les cahiers nouveaux*, 78, 32-42.
- Delbeuck C. (coord.) et al. (2007). Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007. Ministère de la Région wallonne. Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement. Direction de la Coordination de l'Environnement. 720 p.
- De Putter Th. (2012). Considérations et perspectives sur la question de l'exploitation illégale des ressources minérales dans la Région des Grands Lacs et sur le Dodd-Frank Act américain. In S. Marysse et J. Omasombo (eds), *Conjonctures congolaises: chroniques et analyses de la RDC en 2011*. Cahiers africains 80, MRAC-L'Harmattan, Paris, 61-74.
- FEDIEX (2011). Rapport annuel 2011, 26 p. <http://www.fediex.be/uploads/File/RA-Fediex-fr-2011web.pdf> (consulté le 12 novembre 2012).
- Goemare E. (2002). L'industrie extractive non-énergétique en Belgique sous l'angle du développement durable. *Geological Survey of Belgium, Professional Paper*, 2002/2, 297, 82 p.
- Gulinck M. (1958). Atlas de Belgique. Planche 39. Carrières. Académie royale de Belgique, comité national de géographie, commission de l'atlas national, Bruxelles, 27 p.
- Jacquemot P. (2009). Ressources minérales, armes et violences dans les Kivus (RDC). *Hérodote* 134/3, 38-62.
- Mukanirwa Tshimpambu, 2006. Les filières du diamant dans le Kasai. In Grama (éd.), *Actes du colloque Gouvernance et Secteur minier : le défi congolais*. Montréal : Grama, pp. 16-19.
- Poskin E., *Activités extractives en Wallonie : une coordination nécessaire*. Rapport Etopia, 11 p. http://www.etopia.be/IMG/pdf/Poskin_extraction.pdf (consulté le 12 septembre 2012).
- Poty E., Chevalier E. (2004). L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives. Ministère de la Région Wallonne, Direction générale de l'Aménagement du territoire, du logement et du patrimoine. Jambes, 85 p.
- Remacle A. (2005). L'inventaire des carrières de Wallonie (Belgique) : présentation générale et aspects entomologiques. *Notes fauniques de Gembloux* 57, 73-79.
- Valenchon P. (2008). Avant-propos. In : *Le recyclage (volume 1)*, Les ouvrages de l'industrie minérale, Société de l'industrie minérale, Paris, 19-21.
- Van de Casteele Y., Brevers F., Cocle D. (2008). Activités extractives en Wallonie. Essai d'établissement d'un état des lieux de la consommation des ressources, estimation des besoins et réflexions d'ordre stratégique. *Territoire(s) wallon(s)*, 2, 23-34.

